

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

Т. В. Алферова, В. В. Бахмутская

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05
«Электроснабжение предприятий
агропромышленного комплекса»
дневной формы обучения**

Гомель 2009

УДК 621.311.031(075.8)
ББК 31.29-5я73
А53

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 29.06.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. В. Тодарев*

Алферова, Т. В.
А53 Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса : лаборатор.
практикум для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации
1-43 01 03 05 «Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса» днев.
формы обучения / Т. В. Алферова, В. В. Бахмутская. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. –
91 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное
место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа:
<http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Предназначен для закрепления теоретических навыков и знаний, полученных студентами
при изучении дисциплины «Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса».

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05
«Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса» дневной формы обучения.

УДК 621.311.031(075.8)
ББК 31.29-5я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель изучения курса "Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса" заключается в формировании знаний, позволяющих грамотно и эффективно проектировать и вести эксплуатацию систем электроснабжения.

Лабораторные работы по курсу посвящены изучению основных элементов систем электроснабжения предприятий; исследованию графиков нагрузок, отклонений напряжения сети на работу электроприемников; расчету электрических нагрузок и защитных аппаратов.

Данный лабораторный практикум содержит 9 лабораторных работ и охватывает весь курс дисциплины "Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса".

Для каждой работы представлены: цель работы, методические указания к ее выполнению, перечень литературных источников и вопросы для самопроверки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Тема: Исследование графиков электрических нагрузок в решении задач электроснабжения

Цель работы:

1. Изучить типы графиков нагрузки потребителей электроэнергии, их характеристики, а также практические задачи электроснабжения, решаемые на основе графиков электрических нагрузок;
2. Ознакомиться со справочными материалами по режимам электрических нагрузок приемников и потребителей электроэнергии;
3. Определение и анализ показателей, характеризующих графики нагрузок потребителей электроэнергии.

Теоретическая часть

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения имеют дело с тремя видами электрической нагрузки:

- активная мощность нагрузки P ;
- реактивная мощность нагрузки Q ;
- ток I .

Кривая, характеризующая изменение нагрузки во времени называется графиком электрической нагрузки (рис. 1.1).

Под величиной нагрузки в данный момент времени понимается ее действующее значение, показываемое измерительными приборами с достаточно малой инерцией.

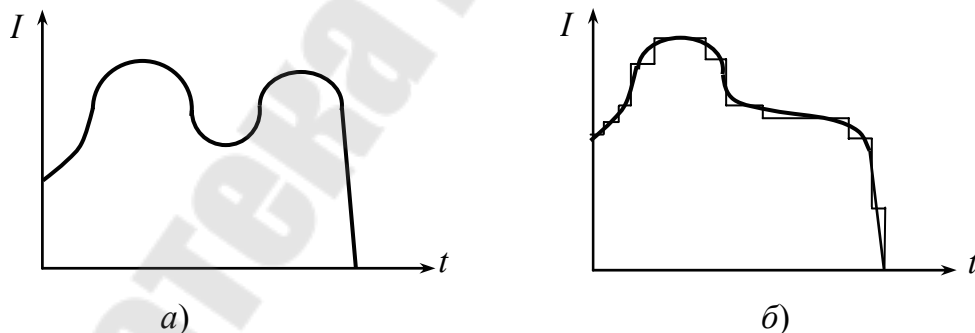


Рис. 1.1. Непрерывный (а) и дискретный (б) графики нагрузки

Для решения практических задач электроснабжения непрерывный график заменяют дискретным (рис. 1.1, б). Он может быть получен при помощи счётчиков электрической нагрузки.

Различают индивидуальные и групповые графики электрической нагрузки – соответственно, для отдельных электроприёмников и для группы электроприёмников.

Зная индивидуальные графики нагрузки можно получить групповой:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t); Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t); I(t) = \frac{\sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}}{\sqrt{3} \cdot U_H}.$$

Выражение $I(t) \approx \sum_1^n i_i(t)$ можно использовать тогда, когда коэффициенты мощности электроприёмников, формирующих групповой график нагрузки, примерно равны.

Для групповых графиков нагрузки степень регулярности определяется не только типами слагающих его индивидуальных графиков, но и взаимозависимостями нагрузок отдельных электроприёмников.

С точки зрения периодичности различают следующие типы групповых графиков нагрузки:

- нерегулярные;
- почти периодические.

В большинстве случаев имеют место почти периодические групповые графики нагрузки (рис. 1.2).

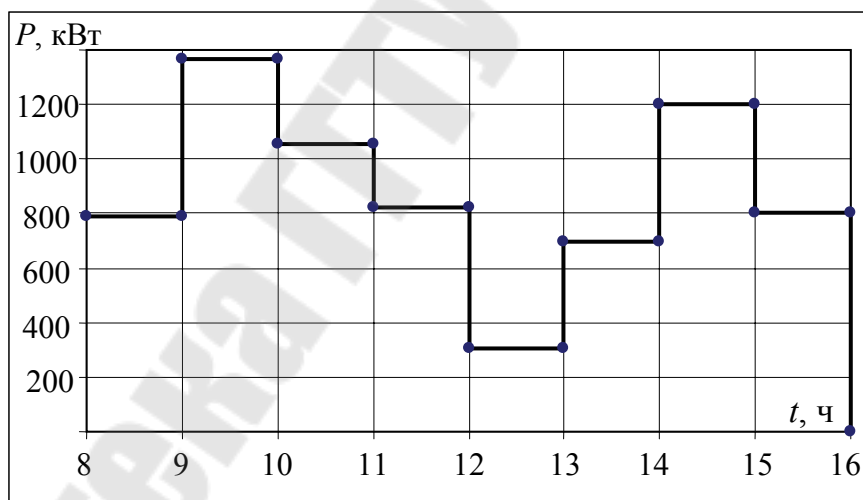


Рис. 1.2. Групповой график нагрузки потребителя электроэнергии за смену

Групповые графики нагрузки, для которых характерна повторяемость нагрузки в течение разных смен в определённые временные интервалы, называют почти периодическими.

Групповые графики нагрузки, используемые для решения практических задач электроснабжения, делятся на: суточные (сменные); годовые (по месяцам); упорядоченные; типовые.

Суточные (сменные) графики нагрузки (рис. 1.2) характеризуют изменение нагрузки в течение суток (смены). При этом следует различать рабочие сутки, а также выходные и праздничные дни, нагрузка в которые существенно ниже. Особенностью суточных графиков нагрузки является их неравномерность, когда наблюдаются утренний и вечерний максимумы. Ночью нагрузка существенно снижается. Исключение составляют потребители с непрерывным техническим процессом.

Годовые графики нагрузки характеризуют изменение нагрузки по месяцам в течение года (рис. 1.3).

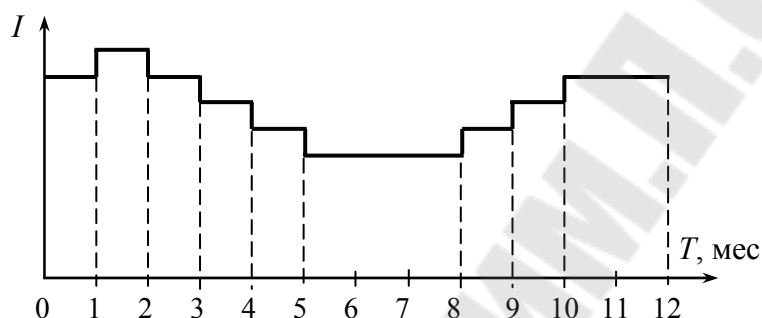


Рис. 1.3. Годовой график нагрузки потребителя электроэнергии

Различают два периода:

- 1) осеннее-зимний (1 и 4 кварталы года);
- 2) весеннее-летний (2 и 3 кварталы года).

Для годовых графиков нагрузки характерно снижение нагрузки в течение летнего периода и увеличение её в зимний период. Данные графики используются для определения сезонного фактора нагрузки, что имеет существенное значение при проектировании систем электроснабжения потребителей электроэнергии сельскохозяйственного производства.

Упорядоченные графики нагрузки показывают время работы потребителя с определённой нагрузкой за принятый временной промежуток, например, за сутки, или за год (рис. 1.4).

Упорядоченные графики используют для определения расхода электроэнергии и времени использования максимума нагрузки T_m , времени максимальных потерь τ , а также для установления закона распределения вероятности нагрузки.

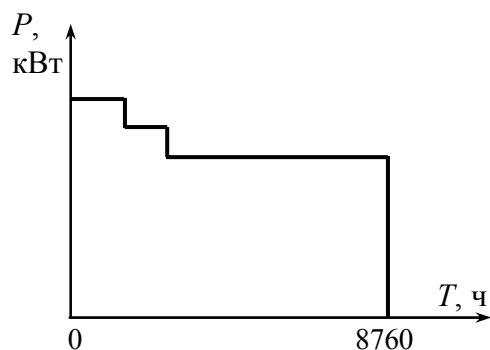


Рис. 1.4. Упорядоченный график нагрузки потребителя электроэнергии

Типовой график нагрузки – усреднённый по времени и набору электроприёмников график нагрузки аналогичных по режиму работы потребителей.

При большом количестве электроприёмников, входящих в группу (цех, завод, жилой дом, район) их групповой график нагрузки становится устойчивым, почти периодическим.

Различают типовые графики сельскохозяйственных потребителей, промышленных потребителей (по отраслям) и потребителей коммунально-бытового сектора. Данные типовых графиков нагрузки приводятся в справочной литературе в относительных единицах и используются при проектировании систем электроснабжения потребителей.

Нагрузка типового графика, как правило, нормируется относительно максимального значения и представляется в процентах.

В отличие от промышленных потребителей вечерний максимум нагрузки потребителей коммунально-бытового сектора больше, чем утренний.

При рассмотрении типовых графиков нагрузки имеют место характерные графики за летний и зимний дни. Для различия графиков нагрузки по сезонам года используют коэффициент сезонности (в основном, для потребителей сельского хозяйства).

Коэффициент сезонности – отношение математического ожидания максимума нагрузки данного месяца к математическому ожиданию годового максимума нагрузки.

При проектировании систем электроснабжения следует учитывать, что время наступления максимальной нагрузки у различных потребителей разное, поэтому при совместном электропитании этих по-

требителей необходимо учитывать эффект несовмещения максимумов их нагрузки.

Очевидно, что суммарная максимальная нагрузка потребителей меньше суммы их максимумов:

$$P_{\text{мy}} \leq \sum P_{\text{M}_i}.$$

Данное явление характеризуется коэффициентом совмещения максимумов:

$$K_0 = K_{\Sigma} = \frac{P_{\text{мy}}}{\sum P_{\text{M}_i}}.$$

Значения этого коэффициента представлены в справочной литературе для различных потребителей электроэнергии. Также он может быть определен в зависимости от коэффициента использования и времени использования максимума нагрузки потребителей электроэнергии по справочным номограммам:

$$K_0 = f(K_{\text{и}}; T_{\text{м}}).$$

Таким образом, типовые графики нагрузки (как правило, суточные) приводятся в справочной литературе, где нагрузка представлена в относительных единицах. Однако на практике оперировать с графиками нагрузки не всегда удобно, поэтому при расчётах электрических нагрузок, согласовании технических условий на электроснабжение, решении задач на лимитирование и управление электропотреблением пользуются показателями, характеризующими графики нагрузки.

При известной установленной мощности $P_{\text{уст}}$ и известном графике электрических нагрузок можно определить физические величины и безразмерные коэффициенты ГЭН.

Физические величины графиков нагрузки

Физические величины, характеризующие графики электрических нагрузок, следующие:

1. $P_{\text{с}}$ – средняя нагрузка ($Q_{\text{с}}, S_{\text{с}}, I_{\text{с}}$);
2. $P_{\text{ск}}$ – среднеквадратичная (эффективная) нагрузка ($Q_{\text{ск}}, S_{\text{ск}}, I_{\text{ск}}$);
3. $P_{\text{м}}$ – максимальная нагрузка ($Q_{\text{м}}, S_{\text{м}}, I_{\text{м}}$):
 - а) $P_{\text{р}}$ – расчётная (максимальная длительная) нагрузка;
 - б) $P_{\text{пик}}$ – пиковая (максимальная кратковременная) нагрузка.

Средняя нагрузка – постоянная, неизменная во времени нагрузка в течение рассматриваемого промежутка времени, которая вызыва-

ет такой же расход электроэнергии, что и реальная, изменяющаяся нагрузка за этот же промежуток времени (T):

$$P_c = \frac{\int_0^T P(t) dt}{T}.$$

На практике средняя нагрузка определяется по показателям электрических счётчиков, либо других приборов, с помощью формул:

$$P_c = \frac{W}{T}; \quad Q_c = \frac{V}{T}; \quad P_c = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T};$$

$$i_c = \frac{1}{\sqrt{3}U_n \cdot T} \int_0^T \sqrt{P^2 + Q^2} dt \approx \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3}U_n};$$

$$P_c = \sum p_{c_i}; \quad Q_c = \sum q_{c_i}; \quad I_c \approx \sum i_{c_i}.$$

В практических целях в качестве средней нагрузки используется среднечасовая, средняя нагрузка за смену, за сутки, среднегодовая нагрузка. Для определения расчётной нагрузки используется средняя нагрузка за наиболее нагруженную смену, в качестве которой выбирается смена с наибольшим расходом электроэнергии. Средняя мощность используется также и для определения расхода электроэнергии потребителей.

Среднеквадратичная нагрузка – такая неизменная в течение промежутка времени T нагрузка, которая вызывает потери мощности и энергии в элементах системы электроснабжения потребителей такие же, как реальная изменяющаяся за это же время (T) нагрузка:

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P^2(t) dt}; \quad I_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I^2(t) dt}; \quad P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}}.$$

Среднеквадратичная нагрузка используется для определения потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения.

Понятие «среднеквадратичной нагрузки» приводит к понятиям «дисперсия нагрузки» и «стандартного отклонения нагрузки»:

$$DP = P_{\text{ск}}^2 - P_c^2; \quad DI = I_{\text{ск}}^2 - I_c^2;$$

$$\sigma_P = \sqrt{DP}; \quad \sigma_I = \sqrt{DI}.$$

Максимальная нагрузка – это наибольшая из средних нагрузок за рассматриваемый промежуток времени. При этом различают максимальную длительную и кратковременную нагрузки.

Максимальная длительная нагрузка характеризуется периодом усреднения от нескольких минут до нескольких часов. Она используется для выбора токоведущих частей СЭС по условию нагрева.

Максимальная кратковременная нагрузка характеризуется периодом усреднения от доли до нескольких секунд. Её называют пиковой нагрузкой:

$$I_{\text{пик}} > I_{\text{м}} \geq I_{\text{ск}} \geq I_{\text{с}}.$$

Пиковая нагрузка используется для расчётов релейной защиты и автоматики, выбора предохранителей и автоматических выключателей.

Из максимальной длительной нагрузки важнейшее значение имеет расчётная нагрузка. Под расчётной нагрузкой понимается такая условная нагрузка, которая эквивалентна реальной нагрузке по наиболее тяжелому тепловому эффекту. В связи с этим рассматривают следующие 2 определения расчётной нагрузки:

- 1) расчётная нагрузка, определяющая нагрев (износ) изоляции;
- 2) расчётная нагрузка, определяющая нагрев токоведущих частей.

Из 2-х значений расчётной мощности используют наибольшее значение. Как правило, этим значением является нагрузка, которая обуславливает наибольший нагрев проводника над температурой окружающей среды. При этом значение расчётной мощности определяется, как:

$$P_{\text{р}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{р}} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_{\text{ср.взв}}; \quad \cos\varphi_{\text{ср.взв}} = \frac{W}{\sqrt{W^2 + V^2}}.$$

Так как нагрев проводника определяется продолжительностью нагрузки, то должны существовать определённые периоды усреднения графика нагрузки. В качестве такого периода принимается величина, равная утроенному значению постоянной времени нагрева токоведущих частей системы электроснабжения, на которые рассчитывается нагрузка:

Коэффициенты графиков нагрузки

Наряду с физическими величинами графики нагрузки описываются безразмерными коэффициентами. Эти коэффициенты устанавливают связь между основными физическими величинами, характеризуют неравномерность графиков нагрузки, а также использование электроприёмников и потребителей электроэнергии по мощности и времени.

Рассмотрим коэффициенты, характеризующие связь между основными физическими величинами графиков нагрузки:

1. Коэффициент максимума графика:

$$k_{\text{м.г.}} = \frac{P_{\text{м.}}}{P_{\text{с.}}}$$

В практике электроснабжения при определении расчетных нагрузок методом упорядоченных диаграмм, вместо коэффициента максимума используют коэффициент расчётной нагрузки:

$$k_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{k_{\text{и}} P_{\text{уст}}},$$

где $P_{\text{р}}$ – расчетная нагрузка, представляет собой максимальную нагрузку, эквивалентную реальной по тепловому эффекту.

Коэффициент максимума относится к групповым графикам нагрузки и устанавливает связь между средней и максимальной нагрузками за наиболее загруженную смену.

Коэффициент расчётной нагрузки определяется по справочным номограммам в зависимости от группового коэффициента использования, эффективного количества электроприёмников и постоянной времени нагрева токоведущих частей:

$$k_{\text{р}} = f(k_{\text{и}}; n_{\text{э}}; T_0).$$

При этом РТМ 36.18.34.4-92 приняты следующие постоянные времени нагрева:

$T_0 = 10$ мин – для сетей напряжением до 1 кВ, выполненных распределительными шинопроводами и шкафами;

$T_0 = 2,5$ ч – для магистральных шинопроводов, вводно-распределительных устройств и цеховых трансформаторных подстанций;

$T_0 \geq 30$ мин – для кабелей напряжением 6-10 кВ, питающих цеховые трансформаторные подстанции и распределительные пункты. Расчетная мощность нагрузки для этих элементов определяется при $K_{\text{р}} = 1$.

2. Коэффициент заполнения графика:

$$k_{\text{з.г.}} = \frac{P_{\text{с.}}}{P_{\text{м}}} = \frac{1}{k_{\text{м}}}.$$

Данный коэффициент определяется, как для группового, так и для индивидуального графика нагрузки.

3. Коэффициент формы графика:

$$k_{\text{ф.г.}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{с}}}, \quad k_{\text{ф.г.}} \geq 1,$$

где $k_{\text{ф.г.}} = 1-1,2$ – для групповых графиков;

$k_{\text{ф.г.}} = 1-3$ – для индивидуальных графиков.

Например, режим работы насосного агрегата привода нефтедобывающего станка-качалки, характеризуется периодическим графиком нагрузки (рис. 1.5). Коэффициент формы такого графика составляет около 2-х, что приводит к высоким потерям мощности и энергии в элементах электроснабжения данной установки. Поэтому, с целью снижения потерь, к одному источнику питания (трансформатору) подключают несколько таких агрегатов, в результате чего выравнивается групповой график нагрузки.

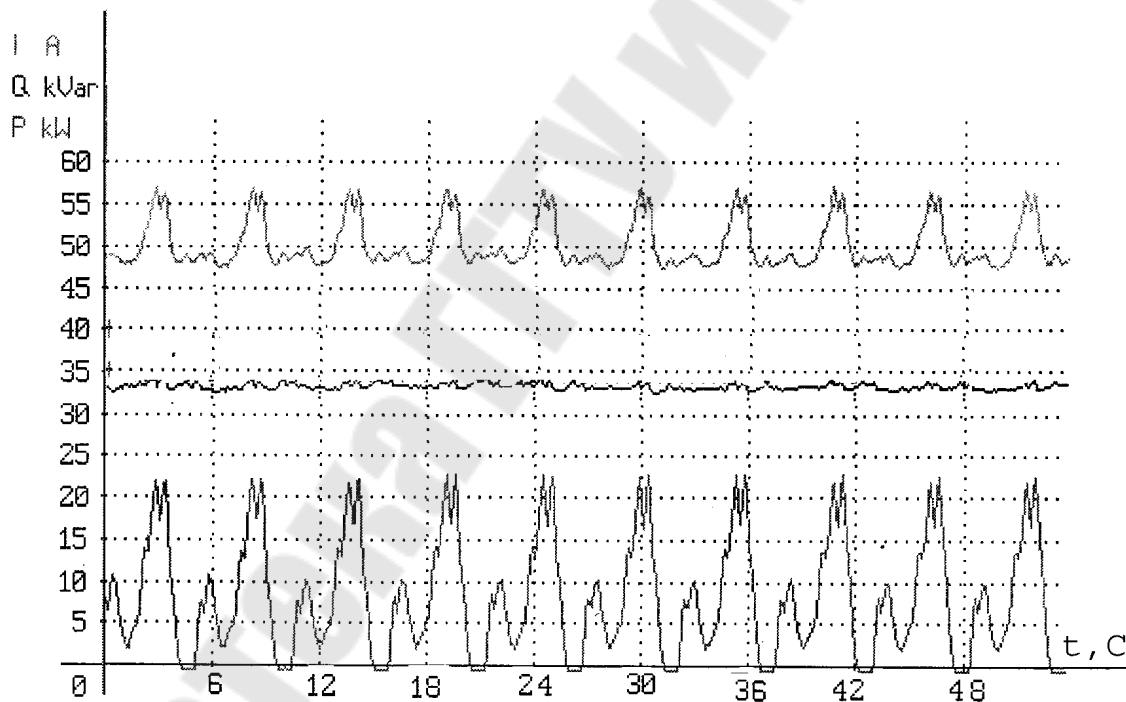


Рис. 1.5. График нагрузки агрегата нефтедобычи типа ШГН с двигателем марки Asle ($P_{\text{H}} = 50$ кВт, $\cos\phi_{\text{H}} = 0,85$)

Коэффициент формы характеризует степень неравномерности графика нагрузки, прямо пропорционален величине потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения потребителя.

Коэффициенты, характеризующие режимы работы приемников и потребителей электроэнергии

1. Коэффициент включения:

$$k_B = \frac{t_B}{t_B + t_O + t_{XX}},$$

где t_B – время включения и работы электроприёмников;

t_O – время отключения электроприёмника;

t_{XX} – время работы в режиме холостого хода.

Для групповых графиков коэффициент включения определяется, как средневзвешенное значение коэффициентов включения входящих в группу электроприёмников:

$$K_B = \frac{\sum k_{B_i} \cdot P_{H_i}}{\sum P_{H_i}}.$$

Коэффициент включения K_B характеризует использование электроприёмников по времени.

1. Коэффициент загрузки:

$$k_3 = \frac{P_{CB}}{P_H},$$

где P_{CB} – средняя мощность нагрузки за время включения электроприёмника:

$$P_{CB} = \frac{T_{Ц}}{T_B} \cdot P_C; \quad P_{CB} = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T_B},$$

где $T_{Ц}$ – время цикла;

T_B – время включения;

P_C – средняя нагрузка за цикл или смену.

Коэффициент загрузки характеризует использование электроприёмников по мощности.

3. Коэффициент использования:

$$k_{И} = \frac{P_C}{P_H}.$$

При заданных индивидуальных коэффициентах использования групповой коэффициент рассчитывается, как средневзвешенное значение по выражению:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum k_{\text{и}i} \cdot P_{\text{н}i}}{\sum P_{\text{н}i}}.$$

Коэффициент использования характеризует использование электроприёмников по мощности и по времени – это один из основных коэффициентов, применяемых при определении расчётной нагрузки. Его значения приведены в справочниках для электрооборудования различных типов (например, для металлообрабатывающих станков, $k_{\text{и}} = 0,12 - 0,2$).

$$k_{\text{и}} = k_{\text{з}} \cdot k_{\text{в}}.$$

4. Коэффициент спроса:

$$K_{\text{с}} = \frac{P_{\text{р}}}{\sum_1^n P_{\text{пасп}i}}; \quad K_{\text{с}} = K_{\text{и}} \cdot K_{\text{м.г.}}$$

Несложно показать, что при известных коэффициентах могут быть определены такие необходимые для практики величины, как:

время использования максимума нагрузки $T_{\text{м}}$:

$$T_{\text{м}} = K_{\text{з.г.}} \cdot T.$$

Время максимальных потерь τ :

$$\tau = (K_{\text{ф.г.}} \cdot K_{\text{з.г.}})^2 \cdot T.$$

Таким образом, режимы работы потребителей электроэнергии (графики электрических нагрузок) характеризуются следующими показателями:

- средняя нагрузка $P_{\text{с}}$, среднеквадратическая (эффективная) нагрузка $P_{\text{ск}}$, максимальная нагрузка $P_{\text{м}}$;
- коэффициент максимума $K_{\text{м.г.}}$, коэффициент заполнения графика нагрузки $K_{\text{з.г.}}$; коэффициент формы графика $K_{\text{ф.г.}}$;
- коэффициент использования $K_{\text{и}}$, коэффициент загрузки $K_{\text{з}}$, коэффициент включения $K_{\text{в}}$, коэффициент спроса $K_{\text{с}}$.

С использованием данной системы показателей решается значительное количество задач электроснабжения:

- определение расхода электроэнергии;
- определение потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения;
- определение расчетной нагрузки и выбор токоведущих элементов электроснабжения.

ЗАДАНИЕ 1:

Для варианта (табл. 1.3) заданы суточный характерный график нагрузки (табл. 1.2) и установленная мощность электроприемников потребителя (табл. 1.1).

Определить:

– физические величины и безразмерные коэффициенты ГЭН.

Таблица 1.1

Установленная мощность электроприемников

	Оборудование	$P_{уст}$, кВт	S_H , кВ·А	$I_{п}/I_H$	КПД
1	Асинхронный двигатель	10		7	0,92
2	Сварочный трансформатор		40	3	0,85
3	Вентилятор	22		2	0,7
4	Электродпечь		105	3	0,96
5	Асинхронный двигатель	20		7	0,98
6	Сварочный трансформатор		32	3	0,95
7	Вентилятор	7,5		2	0,7
8	Электродпечь		110	3	0,9
9	Асинхронный двигатель	50		6	0,98
10	Сварочный выпрямитель		32	3	0,95
11	Вентилятор	18		2	0,7
12	Электродпечь		110	3	0,9
13	Моечная машина	24		4	0,92
14	Асинхронный двигатель	30		7	0,9

Таблица 1.2

Графики нагрузок электроприемников

t, час	Электроприемники													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,5	4	18	14	40	14	18	2	32	12	4	6	30	2	12
1	4	20	14	48	14	20	7	32	28	16	6	32	12	20
1,5	5	20	16	48	15	20	7	34	28	16	10	34	14	20
2	6	27	12	50	15	20	6	34	34	14	10	34	16	20
2,5	6	27	12	50	15	22	6	36	34	14	12	36	18	22
3	8	27	12	55	16	21	5	36	40	14	12	36	18	21
3,5	8	27	16	60	18	21	5	38	40	14	14	70	22	26
4	8	25	15	65	17	20	6	38	46	17	14	70	22	26
4,5	7	26	18	65	17	22	6	40	46	18	14	65	22	20
5	9	24	18	66	17	18	3	43	44	19	14	65	21	18
5,5	7	24	20	72	18	18	3	42	44	19	12	40	21	18
6	6	20	14	78	14	18	6	44	42	16	12	40	21	18
6,5	6	20	14	60	14	18	3	42	42	16	10	38	21	18
7	5	20	10	55	12	18	5	42	40	12	10	30	20	18
7,5	5	24	9	50	10	18	5	40	40	10	6	30	20	18
8	2	15	8	50	10	18	4	40	30	10	6	32	20	18

Таблица 1.3

Вариант задания электроприемников

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ ЭП	1, 2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5, 6	3, 4, 5, 6, 7	4, 5, 6, 7, 8	5, 6, 7, 8, 9	6, 7, 8, 9, 10	7, 8, 9, 10, 11	8, 9, 10, 11, 12	9, 10, 11, 12, 13	10, 11, 12, 13, 14
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
№ ЭП	11, 12, 13, 14, 1	12, 13, 14, 1, 2	13, 14, 1, 2, 3	14, 1, 2, 3, 4	2, 6, 8, 10, 12	4, 5, 6, 11, 12	5, 6, 10, 11, 12	6, 7, 12, 13, 14	7, 8, 9, 1, 2,	8, 9, 10, 12, 14
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
№ ЭП	3, 4, 5, 8, 9	3, 4, 5, 7, 10	4, 5, 6, 7, 9	4, 5, 6, 8, 10	1, 5, 6, 8, 10	2, 5, 7, 9, 11	1, 3, 5, 9, 13	3, 8, 9, 11, 14	3, 6, 9, 12, 13	4, 6, 8, 10, 14
№ варианта	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
№ ЭП	7, 8, 9, 12, 13	7, 8, 10, 12, 14	8, 9, 11, 12, 13	7, 9, 11, 13, 14	1, 2, 6, 7, 8	1, 2, 7, 9, 10	2, 3, 4, 9, 10	2, 3, 5, 14, 12	4, 5, 6, 12, 13	3, 4, 5, 14, 13
№ варианта	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
№ ЭП	3, 5, 7, 13, 14	2, 4, 5, 7, 14	2, 6, 9, 11, 13	8, 10, 12, 13, 14	1, 4, 8, 12, 14	1, 5, 6, 8, 10	6, 7, 12, 13, 14	6, 7, 8, 9, 10	7, 8, 10, 12, 14	12, 13, 14, 1, 2

Таблица 1.4

Ход и результаты расчетов

Величина	Расчет	Значение	
		о.е.	именован- ные
Уст. мощность, $P_{уст}$	Согласно варианту задания	-	500 МВт
Коэффициент спроса, K_c	Определяются по справочным данным	0,5	-
$\cos\varphi$		0,8	-
Средняя нагрузка, P_c	$P_c = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T}$	0,9	225,2 МВт
Среднеквадратическая нагрузка, $P_{ск}$	$P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}}$	0,904	226 МВт
Максимальная на- грузка, P_m	$P_m = P_{уст} \cdot K_c$	1	250 МВт
Коэффициент макси- мума графика, $K_{м.г.}$	$K_{м.г.} = \frac{P_m}{P_c}$	1,11	-
Коэффициент запол- нения графика, $K_{з.г.}$	$K_{з.г.} = \frac{P_c}{P_m}$	0,901	-
Коэффициент формы графика, $K_{ф.г.}$	$K_{ф.г.} = \frac{P_{ск}}{P_c}$	1,003	-
Коэффициент исполь- зования, $K_{и}$	$K_{и} = \frac{P_c}{P_{уст}}$	0,45	-
Коэффициент спроса, K_c	$K_c = \frac{P_m}{P_{уст}}$	0,5	-
*Время использова- ния максимума на- грузки, T_m	$T_m = K_{з.г.} \cdot T$	-	21,6 ч/сут; 7880 ч/год
Время максимальных потерь, τ	$\tau_{сут} = (K_{ф.г.} \cdot K_{з.г.})^2 \cdot T_{уст};$ $\tau = (0,124 + T_{м.г.} \cdot 10^{-4})^2 \cdot T_{г}$	-	19,6 ч/сут; 7290 ч/год
Среднеквадратичное отклонение, σ	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_c)^2 \cdot \Delta t_i}{T}}$	0,075	37,5 МВт
Расчетная мощность нагрузки, P_p	$P_p = P_c + \beta \cdot \sigma, \text{ при } \beta = 1,65$	-	287 МВт
	$W_{г} = \alpha \cdot P_m \cdot T_m = \alpha \cdot P_m \cdot \frac{T_{г}}{K_{м.г.}}$	-	$1,776 \cdot 10^9$ кВт·ч/год

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Постановка и ход решения задания.
3. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются графики электрических нагрузок? Как рассчитываются безразмерные коэффициенты графиков нагрузки?
2. Какова взаимосвязь между физическими величинами, показателями графиков и режимов электрических нагрузок потребителей? Какие величины являются справочными?
3. Как рассчитываются и в чем заключается физический смысл величин, характеризующих графики нагрузки?
4. Как классифицируются графики нагрузки потребителей электроэнергии? Для решения каких практических задач они используются?
5. Как определить расход электроэнергии потребителя при известном графике нагрузки; при заданных величинах графиков нагрузки?
6. Каким методом определяется расчетная нагрузка потребителя электроэнергии, если известны графики нагрузки? Приведите расчетные формулы.
7. Возможно ли, используя график нагрузки потребителя, рассчитать потери мощности в элементах его системы электроснабжения? Приведите расчетные формулы для ориентировочного определения потерь мощности в элементах системы электроснабжения.

Список литературы

1. Ус А.Г., Евминов Л.И. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий. – Мн.: "Пион", 2002. – 457 с.
2. Радкевич В.Н. Проектирование систем электроснабжения. – Мн.: НПО «Пион», 2001. – 292 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В двух томах. Под общей ред. Федорова А.А. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1971.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Тема: Режимы работы нейтрали в электрических сетях

Цель работы:

1. Изучить режимы работы нейтрали в электрических сетях.
2. Выяснить особенности схем с различными видами нейтрали.

Теоретическая часть

Выбор способа заземления нейтрали связан, главным образом, с поведением системы при замыканиях на землю и, в первую очередь, с возникающими при этом перенапряжениями.

Кроме того, при выборе способа заземления нейтрали затрагиваются следующие вопросы:

1. Надежность работы сети.
2. Бесперебойное снабжение электрической энергией потребителей.
3. Экономичность системы.
4. Ограничение электромагнитного влияния на линии связи.
5. Безопасность системы.
6. Возможность перспективного развития системы.

Как известно, подавляющее большинство замыканий на земле, возникает в электрических сетях в результате импульсного перекрытия изоляции при разрядах с последующим переходом импульсного перекрытия в дуговой разряд. Поэтому принятый способ заземления нейтрали должен в первую очередь обеспечить наиболее быструю ликвидацию дуги замыкания на землю по возможности без нарушения электроснабжения потребителей.

Вопрос о режимах работы нейтрали в электрических сетях в настоящее время решается следующим образом:

В системах электроснабжения напряжением 6, 10, 20 и 35 кВ применяется изолированная нейтраль, если величина емкостных токов на землю не превосходят 10 А при напряжении сетей 35 кВ, 15 А – 15-20 кВ, 20 А – 10 кВ, 30 А – 6 кВ, 5 А – в схемах блоков генератор-трансформатор (на генераторном напряжении 6-20 кВ).

Если токи однофазного замыкания на землю превышают указанные выше допустимые значения, то применяют либо компенсацию емкостных токов путем введения в нейтраль дугогасящей катушки, либо заземление нейтрали.

Применение дугогасящих катушек с автоматической настройкой способствует более широкому распространению систем с компенса-

цией емкостных токов технически более совершенных, чем система с изолированной нейтралью. При напряжениях 6 и 10 кВ нейтраль генераторов обычно заземляется через активное сопротивление. В системах напряжением 110, 220 кВ и выше применяется глухое заземление нейтрали с разземлением нейтрали части трансформаторов при необходимости ограничения тока однофазного КЗ.

В электроустановках напряжением до 1000 В применяются следующие режимы нейтрали:

1. Глухое заземление нейтрали трансформаторов и генераторов.
2. Полностью изолированная нейтраль (только у генераторов).
3. Нормально изолированная нейтраль трансформатора с включенным в нейтраль или фазу заземленным пробивным предохранителем.

В четырёхпроводных сетях переменного тока (220/127 и 380/220 В) или трехпроводных сетях постоянного тока, глухое заземление обязательно; при номинальном напряжении 500 и 600 В электроустановок трехфазного тока нейтраль должна быть изолирована. В трехфазных трехпроводных сетях напряжением 380 и 220 В применяется и изолированная, и глухозаземленная нейтраль (ПУЭ не регламентирует запрещение того или иного режима нейтрали). Однако выбор того или иного режима нейтрали должен проводиться с учетом всех местных условий с целью обеспечения наилучших условий безопасности.

Рассмотрим более подробно работу систем с различными режимами нейтрали.

В трехфазной системе каждая единица длины сети обладает емкостью и сопротивлением изоляции по отношению к земле. В сетях напряжением выше 1000 В преобладает емкостная связь (емкостные сопротивления значительно превышают активные и индуктивные сопротивления). Распределенные, вдоль линии емкости и сопротивления изоляции каждого провода относительно земли условно могут быть представлены в виде сосредоточенных эквивалентных емкостей C_A , C_B , C_C , C_N и r_A , r_B , r_C , r_N . Полные проводимости проводов трехфазной четырехпроводной системы относительно земли в комплексной могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 y_A &= g_A + j\omega \cdot C_A; \\
 y_B &= g_B + j\omega \cdot C_B; \\
 y_C &= g_C + j\omega \cdot C_C; \\
 y_N &= g_N + j\omega \cdot C_N,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

где g_A, g_B, g_C, g_0 – активные проводимости изоляции между фазными проводами (А, В, С), нулевым проводом (N) и землей, равные соответственно:

$$g_A = \frac{1}{r_A}, \quad g_B = \frac{1}{r_B}, \quad g_C = \frac{1}{r_C}, \quad g_N = \frac{1}{r_N}.$$

Комплексная проводимость нулевой точки (0) трансформатора, генератора и т.п. относительно земли в зависимости от способа заземления нейтрали может учитываться:

а) сопротивление заземляющего устройства:

$$r_0 = r_3 \quad \text{или} \quad y_0 = g_0 = \frac{1}{r_3};$$

б) сопротивление дугогасящей катушки:

$$r_0 = Z_k = r_k + j\omega L_k \quad \text{или} \quad y_0 = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{r_k + j\omega L_k},$$

где r_k и L_k – соответственно, активное сопротивление и индуктивность катушки;

в) активное сопротивление в цепи нейтрали:

$$r_0 = R \quad \text{или} \quad y_0 = g_0 = \frac{1}{R};$$

г) реактивное индуктивное сопротивление:

$$y_0 = \frac{1}{j\omega L} \quad \text{и т. д.}$$

В трехфазной системе с изолированной нейтралью $y_0 = 0$.

В симметричной трехфазной системе (нагрузка симметрична и $g_A = g_B = g_C, C_A = C_B = C_C$) в нормальном режиме напряжения фаз относительно земли U_A, U_B и U_C симметричны, равны по модулю и равны фазному напряжению U_ϕ . Геометрические суммы активных токов утечки I_{gA}, I_{gB}, I_{gC} и емкостных токов I_{CA}, I_{CB}, I_{CC} соответственно образуют токи I_A, I_B, I_C в фазах, которые равны по модулю, т.е. $I_A = I_B = I_C$ и геометрическая сумма их равна нулю, т.е. $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$, а напряжение смещения нейтрали U_0 равно нулю.

В случаях, если $g_A \neq g_B \neq g_C$, или $C_A \neq C_B \neq C_C$ симметрия системы нарушается, даже при симметричной нагрузке. Напряжение смещения нейтрали U_0 в соответствии с теорией несимметричных режимов трехфазных цепей определяется по формуле:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A \dot{y}_A + \dot{U}_B \dot{y}_B + \dot{U}_C \dot{y}_C}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}. \quad (2.2)$$

Примем, что $U_A = U_\Phi$, тогда $U_B = a^2 \cdot U_\Phi$, $U_C = a \cdot U_\Phi$, где a – фазовый множитель, учитывающий сдвиг фаз.

Выражение (3.2) может быть записано в виде:

$$\dot{U}_0 = U_\Phi \frac{\dot{y}_A + a^2 \cdot \dot{y}_B + a \cdot \dot{y}_C}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}.$$

Напряжения фаз относительно земли при несимметрии систем определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_0 = U_\Phi \frac{(1-a^2)\dot{y}_B + (1-a)\dot{y}_C + \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}; \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_0 = U_\Phi \frac{(a^2-1)\dot{y}_A + (a^2-a)\dot{y}_C + a^2 \cdot \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}; \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_0 = U_\Phi \frac{(a-1)\dot{y}_A + (a-a^2)\dot{y}_C + a \cdot \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Токи при несимметрии системы равны

$$\begin{aligned} \dot{I}'_A &= \dot{U}'_A \dot{y}_A = U_\Phi \dot{y}_A \frac{(1-a^2)\dot{y}_B + (1-a)\dot{y}_C + \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}; \\ \dot{I}'_B &= \dot{U}'_B \dot{y}_B = U_\Phi \dot{y}_B \frac{(a^2-1)\dot{y}_A + (a^2-a)\dot{y}_C + a^2 \cdot \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}; \\ \dot{I}'_C &= \dot{U}'_C \dot{y}_C = U_\Phi \dot{y}_C \frac{(a-1)\dot{y}_A + (a-a^2)\dot{y}_C + a \cdot \dot{y}_0}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ток в нулевом проводе определяется как

$$\dot{I}_0 = \dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C = \dot{U}_0 \dot{y}_0 = U_\Phi \dot{y}_0 \frac{\dot{y}_A + a^2 \dot{y}_B + a \cdot \dot{y}_C}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_0}. \quad (2.5)$$

Выражения (2.2-2.5) являются основными при анализе и расчетах трехфазных систем во всех возможных несимметричных режимах.

Расчетные схемы замещения трехфазных систем с различными способами заземления нейтрали в нормальном режиме представлены на рис. 2.1, а; 2.2, а; 2.3, а; 2.4, а.

Системы с изолированной нейтралью

В большинстве случаев емкостные проводимости фаз относительно земли можно полагать равными, т. е.

$$y_A = y_B = y_C.$$

Расчетная схема замещения в нормальном режиме представлена на рис. 2.1, а. Фазные напряжения относительно земли U_A , U_B , U_C и емкостные токи утечки I_A , I_B , I_C в нормальном режиме равны между собой по модулю и представляют собой симметричную систему токов и напряжений (рис. 2.1, в). Напряжение смещения нейтрали в этом случае равно нулю $U_0 = 0$.

В случае повреждения изоляции и замыкания, например, фазы А на землю (рис. 2.1, б) через место аварии в землю протекает ток I_3 равный

$$\dot{I}_3 = -(\dot{I}'_B + \dot{I}'_C), \quad (2.6)$$

где \dot{I}'_B , \dot{I}'_C – емкостные токи утечки здоровых фаз (В и С) в аварийном режиме.

Емкостная проводимость фазы А при этом шунтируется рассматриваемым замыканием и емкостной ток утечки фазы А в аварийном режиме равен нулю $\dot{I}'_A = 0$. Векторная диаграмма токов и напряжений системы с изолированной нейтралью представлена на рис. 2.1, г. Так как проводимости фаз относительно земли в аварийном режиме не равны (проводимость фазы А на много больше), то возникает несимметрия и как следствие напряжение смещения нейтрали (напряжение между точками O' и O) равное напряжению фазы А

$$\dot{U}_O = \dot{U}_A.$$

Фазные напряжения здоровых фаз в этом случае равны соответственно

$$\begin{aligned} \dot{U}'_B &= -\dot{U}_{AB}, \\ \dot{U}'_C &= -\dot{U}_{CA}, \end{aligned}$$

где U_{AB} и U_{CA} – линейные напряжения между соответствующими фазами в нормальном режиме.

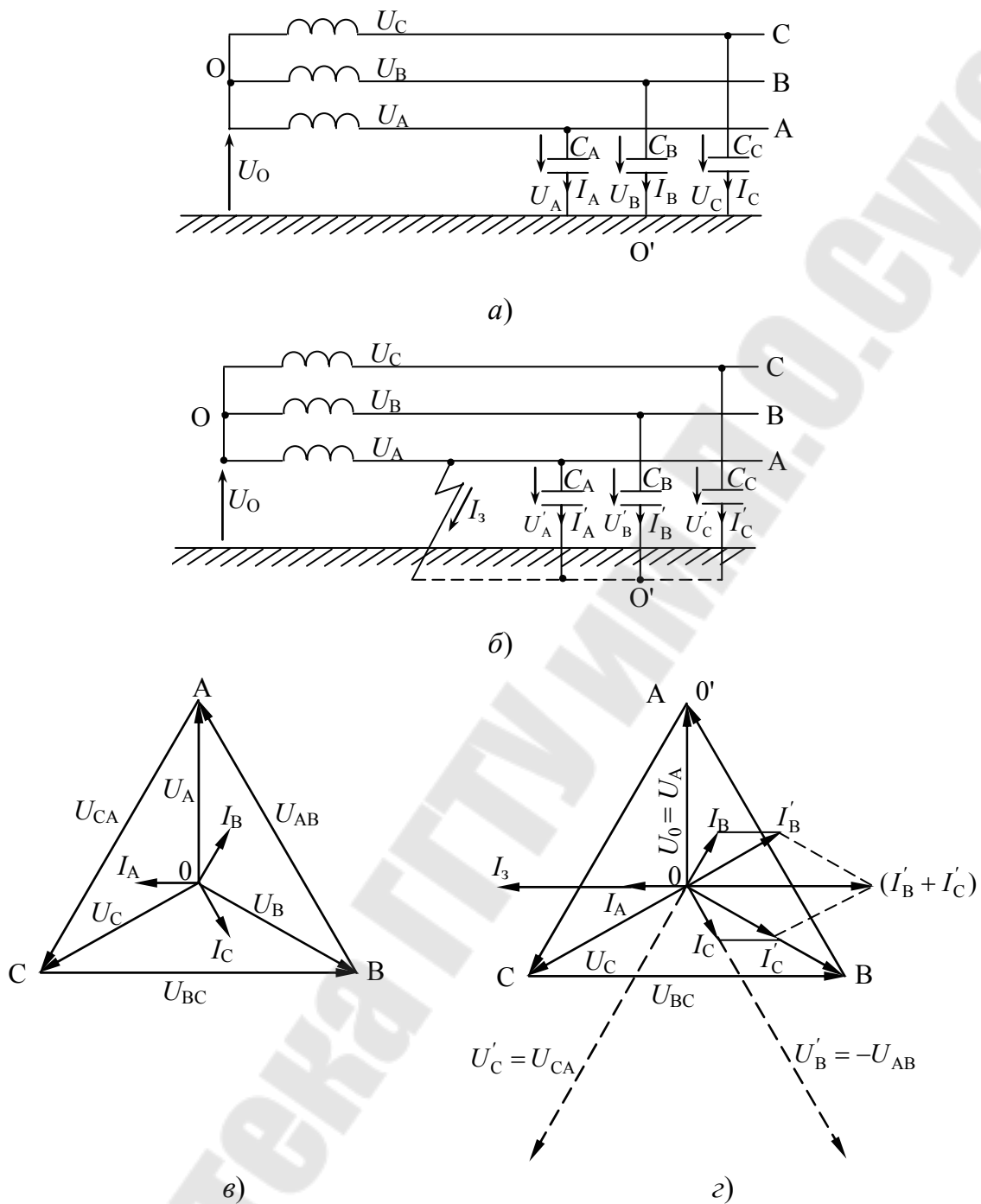


Рис. 2.1. Система с напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью:

- а) расчетная схема замещения в нормальном режиме;
- б) расчетная схема замещения в аварийном режиме работа;
- в) векторная диаграмма токов и напряжений в нормальном режиме;
- г) векторная диаграмма токов и напряжений в аварийном режиме

Следовательно, напряжения здоровых фаз относительно земли увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, во столько же увеличатся емкостные токи

утечки I'_B и I'_C . Угол между напряжениями U'_B и U'_C , а также токами I'_B и I'_C будет равен 60° (рис. 2.1, *з*). Напряжение поврежденной фазы относительно земли будет равно нулю $U'_A = 0$.

Ток замыкания на землю I_3 определяется выражением (2.6) и в 3 раза больше емкостного тока утечки фазы в землю при нормальном режиме работы системы

$$I_3 = -(I'_B + I'_C) = 3 \cdot I'_A.$$

Системы с компенсацией емкостных токов замыкания на землю

Для уменьшения емкостных токов замыкания на землю между нейтралью источников электроэнергии и землей включаются компенсирующие устройства: заземляющие катушки с настроенной индуктивностью или заземляющие трансформаторы. Наибольшее распространение получили заземляющие катушки, которые состоят из сердечника и обмотки, помещенных в кожухе, заполненном трансформаторным маслом. Индуктивность катушки L_k регулируется изменением числа витков или величины зазора сердечника. Активное сопротивление катушки R_k мало по сравнению с индуктивным, поэтому при анализе процессов им можно пренебречь.

Принцип компенсации емкостных токов заземляющими катушкой и трансформаторами практически одинаков, поэтому рассмотрим аварийный режим в системе напряжением выше 1000 В с компенсацией емкостных токов однофазного замыкания на землю при помощи заземляющей катушки. Расчетные схемы замещения системы в нормальном и аварийном режимах представлены на рис. 2.2. Условия нормального режима аналогичны приведенным выше для изолированной нейтрали, ток в катушке равен нулю $I_k = 0$ (рис. 2.2, *в*). При замыкании фазы А на землю напряжения и емкостные токи утечки здоровых и поврежденной фазы изменяются также как и в системе с изолированной нейтралью (рис. 2.2, *з*), т.е.

$$\begin{aligned} U'_A &= 0; \quad U'_B = U'_C = \sqrt{3} \cdot U_\Phi; \\ I'_A &= 0; \quad I'_B = I'_C = \sqrt{3} \cdot I_\Phi; \\ I'_A &= 0, \end{aligned}$$

где U_Φ , I_Φ – фазные напряжения и токи утечки в системе при нормальной работе.

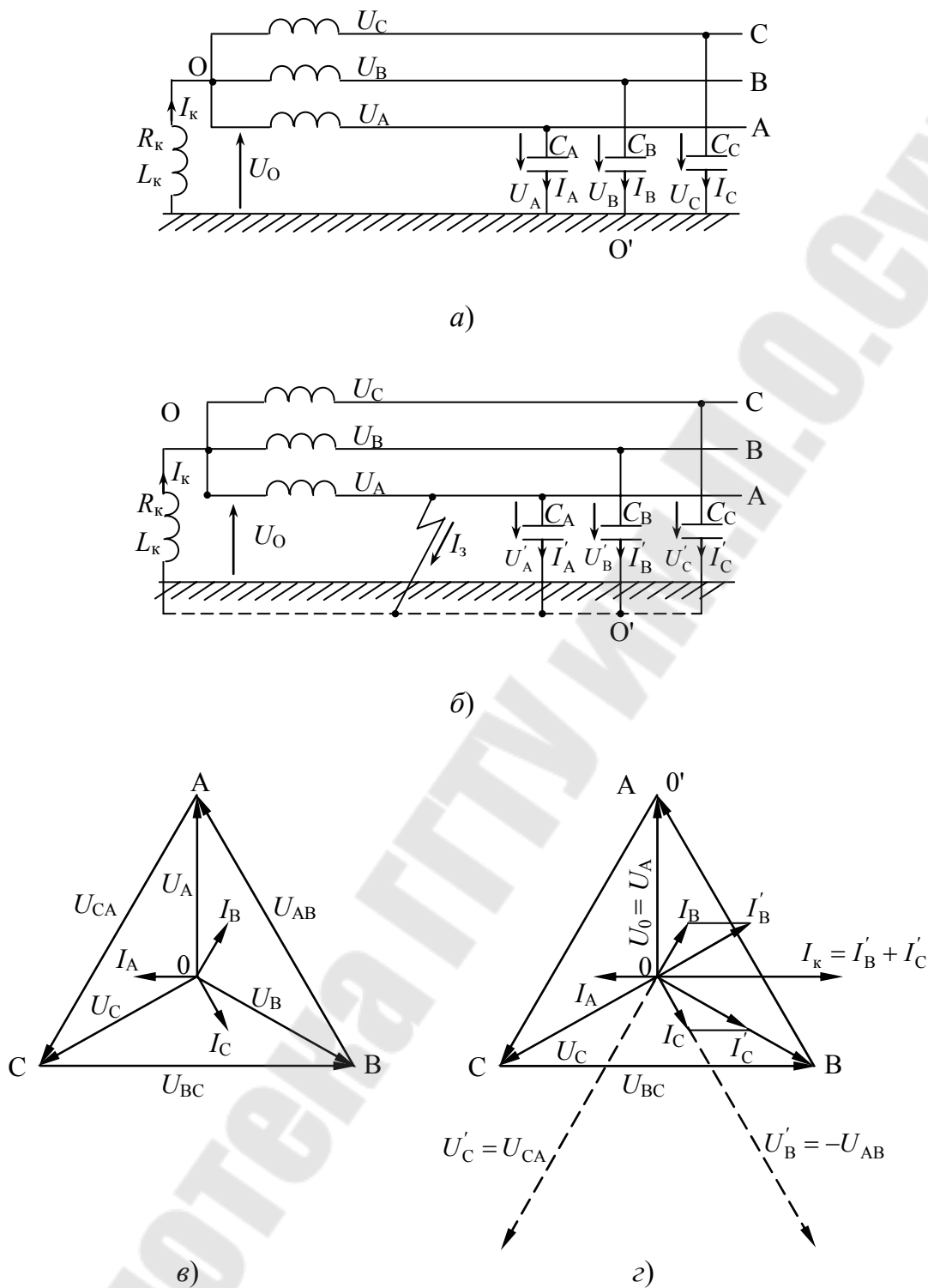


Рис. 2.2. Система с напряжением выше 1000 В с компенсированной нейтралью:

- а) расчетная схема замещения в нормальном режиме;
- б) расчетная схема замещения в аварийном режиме работы;
- в) векторная диаграмма токов и напряжений в нормальном режиме;
- г) векторная диаграмма токов и напряжений в аварийном режиме

При этом заземляющая катушка оказывается под фазным напряжением

$$\dot{U}_O = \dot{U}_A$$

и протекает индуктивный ток катушки I_k , который отстает от напряжения катушки на 90° (рис. 3.2, з). Ток замыкания на землю в этом случае определяется по следующему выражению

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_k - (\dot{I}'_B + \dot{I}'_C).$$

При резонансной настройке катушки, когда

$$j\omega L_k = \frac{1}{j3\omega C} \quad (2.7)$$

теоретически ток замыкания на землю равен нулю. Однако на практике, из-за наличия активных составляющих в сопротивлении катушки и изоляции фаз относительно земли, ток замыкания на землю не равен нулю.

Системы с глухозаземленной нейтралью

Однофазное замыкание на землю в системах с глухозаземленной нейтралью (трехпроводной и четырехпроводной напряжением до и выше 1000 В) представляет собой однофазное короткое замыкание (рис. 2.3), так как поврежденная фаза оказывается короткозамкнутой через землю и нейтраль трансформатора или генератора. Ток в месте повреждения ограничен только сопротивлениями источников питания и линий и поэтому является током КЗ. При этом ток замыкания практически не зависит от величины сопротивления изоляции и емкости системы относительно земли.

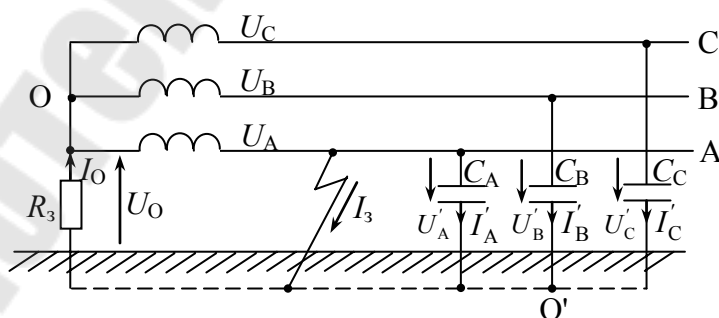


Рис. 2.3. Система с глухозаземленной нейтралью в аварийном режиме

Ток однофазного замыкания на землю, например, фазы А определяется выражением

$$I_3 = \frac{U_A}{R_3 + R_A},$$

где R_3 – сопротивление заземления нейтрали,

R_A – сопротивление провода фазы А до места повреждения.

И так как величины сопротивлений R_3 и R_A малы, то ток КЗ достигает больших значений (тысячи ампер) и приводит в действие релейную защиту, отключающую поврежденный участок системы.

Приборы и оборудование

Лабораторная установка собрана в виде модели системы электроснабжения 3-х фазного тока, позволяющая путем простейших переключений создавать различные режимы нейтрали. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис.4. Распределение емкости проводов относительно земли в трехфазной системе представлены на стенде в виде сосредоточенных емкостей C_A , C_B , C_C , соответственно фаз А, В и С относительно земли.

Изменяя величины С1-С9 при помощи выключателей S1-S9, можно получить систему с разными параметрами C_A , C_B , C_C .

Ввод трехфазного переменного тока на стенд осуществляется автоматом QF1. Выключатели S10-S12 позволяют осуществить работу системы с различными режимами нейтрали.

Перед началом работы все автоматы и выключатели на стенде должны быть в положении «отключено».

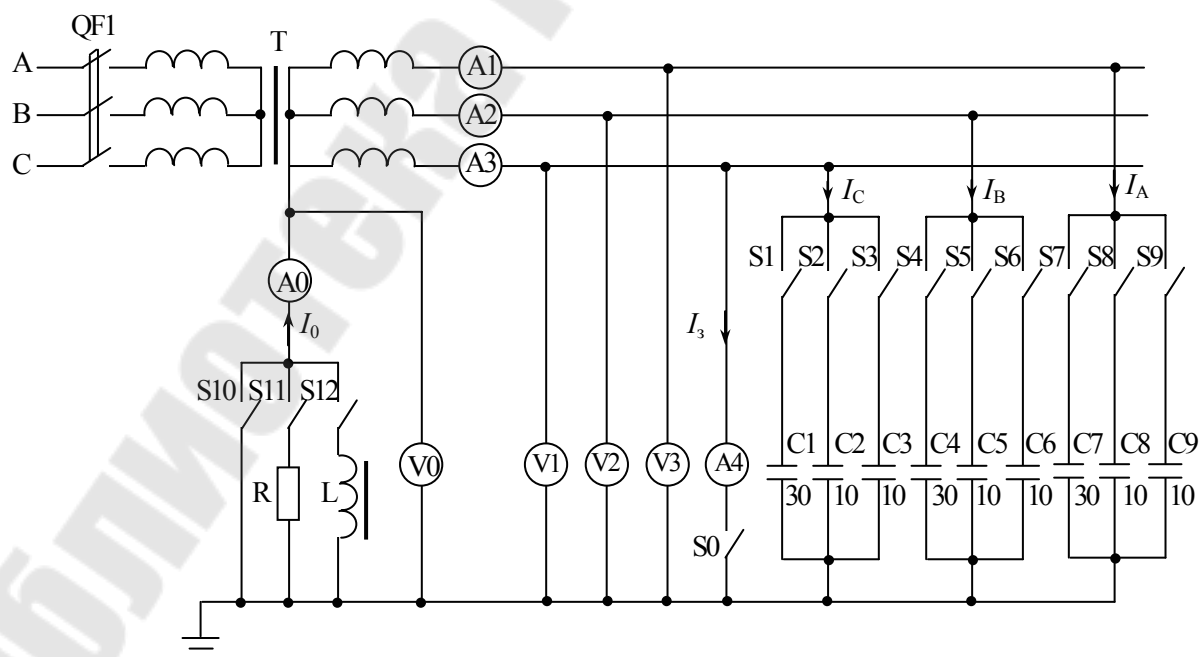


Рис. 2.4. Принципиальная схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

I. Ознакомиться со схемой, приборами и оборудованием лабораторной установки.

II. Выявить особенности системы с глухозаземленной нейтралью в нормальном и аварийном режимах.

Для проведения опытов заземлить нейтраль включением S10 и подать напряжение в систему автоматом QF1.

ОПЫТ 1. Нормальный режим работы системы (симметричный).

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 50$ мкФ включением выключателей S1-S9.

2. Измерить величины напряжения каждой фазы U_A, U_B, U_C (с помощью вольтметров V1-V3) и нулевой точки трансформатора U_0 (с помощью вольтметра V0) относительно земли и величины токов в проводах фаз I_A, I_B, I_C , (амперметрами A1-A3) и нейтрали I_0 (амперметр A0). Результаты измерений записать в таблицу (см. образец формы).

ОПЫТ 2. Нормальный режим работы системы (несимметричный).

1. Установить несимметричное состояние системы; $C_A = 10$ мкФ; $C_B = 30$ мкФ; $C_C = 50$ мкФ.

2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 3. Аварийный режим работы сети.

1. Произвести замыкание фазы С на землю при любом состоянии системы с глухозаземленной нейтралью. Замыкание осуществить включением автомата S0. При этом следует **убедиться в отсутствии** в схеме амперметра A4, который может выйти из строя при прохождении через него тока замыкания на землю в системе с глухозаземленной нейтралью. Система должна отключиться защитой.

2. Возвратить все выключатели в положение «отключено».

III. Выявить особенности системы с нейтралью, заземленной через активное сопротивление в нормальном и аварийном режимах.

Для проведения опытов заземлить нейтраль через активное сопротивление R включением S11 и подать напряжение в систему.

ОПЫТ 4. Нормальный режим работы системы (симметричный).

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 50$ мкФ включением выключателей S1-S9.

2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 5. Нормальный режим работы системы (несимметричный).

1. Установить несимметричное состояние системы; $C_A = 10$ мкФ; $C_B = 30$ мкФ; $C_C = 50$ мкФ.

2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 6. Аварийный режим работы системы.

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 20$ мкФ.

2. Произвести замыкание фазы С на землю включением автомата S0.

3. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$ и ток замыкания на землю I_3 . Результаты измерений внести в таблицу.

4. По данным измерений подсчитать величину сопротивления R , через которое заземлена нейтраль и внести ее в таблицу.

5. Возвратить все выключатели в положение «отключено».

IV. Выявить особенности системы с изолированной нейтралью в нормальном и аварийном режимах.

Для проведения опытов в системе с изолированной нейтралью подать напряжение в систему автоматом QF1.

ОПЫТ 7. Нормальный режим работы системы (симметричный).

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 50$ мкФ включением выключателей S1-S9.

2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 8. Нормальный режим работы системы (несимметричный).

1. Установить несимметричное состояние системы; $C_A = 10$ мкФ; $C_B = 30$ мкФ; $C_C = 50$ мкФ.

2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 9. Аварийный режим работы системы (симметричный).

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 20$ мкФ.
2. Произвести замыкание фазы С на землю включением автомата S0.
3. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C$ и I_3 . Результаты измерений внести в таблицу.

ОПЫТ 10. Аварийный режим работы системы (несимметричный).

1. Установить несимметричное состояние системы; $C_A = 20$ мкФ; $C_B = 30$ мкФ; $C_C = 40$ мкФ.
2. Произвести замыкание фазы С на землю включением автомата S0.
3. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C$ и I_3 . Результаты измерений внести в таблицу.
4. Возвратить все выключатели в положение «отключено».

5. Выявить особенности системы с компенсированной нейтралью в нормальном и аварийном режимах.

Для проведения опытов заземлить нейтраль через катушку индуктивности включением S12 и подать в систему напряжение.

ОПЫТ 11. Нормальной режим работы системы (симметричный).

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 50$ мкФ включением выключателей S1-S9.
2. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$. Результаты измерений записать в таблицу.

ОПЫТ 12. Аварийный режим работы системы

1. Установить симметричное состояние системы $C_A = C_B = C_C = 10$ мкФ.
2. Произвести замыкание фазы С на землю включением автомата S0.
3. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$ и I_3 . Результаты измерений внести в таблицу.
4. Отключить катушку индуктивности от земли автоматом S12. Измерить величины $U_A, U_B, U_C, U_0, I_A, I_B, I_C, I_0$ и I_3 и результаты измерений внести в таблицу.

5. По окончании опыта установить S0 в положение "отключено", а S12 – "включено", подготовив тем самым схему для следующего опыта.

ОПЫТ 13. Аварийный режим работы системы

1. Установить симметричное состояние системы
 $C_A = C_B = C_C = 20$ мкФ.

Пункты 2-5 аналогичны соответствующим пунктам опыта 12.

ОПЫТ 14. Аварийный режим работы системы

1. Установить симметричное состояние системы
 $C_A = C_B = C_C = 30$ мкФ.

Пункты 2-5 аналогичны соответствующим пунктам опыта 12.

После выполнения опыта 14 все автоматы и выключателя должны быть отключены.

Меры безопасности

1. Не включать стенд без разрешения преподавателя.
2. Не касаться токоведущих частей стенда при включенном питании.
3. При анализе системы с глухозаземленной нейтралью в аварийном режиме (опыт 3) не включать в схему амперметр для измерения тока замыкания.

Содержание отчета

1. Принципиальные схемы исследованных систем с указанием принятых положительных направлений токов и напряжений в нормальном и аварийном режимах.
2. Результаты измерений и расчетов по результатам опытов 1-14 в виде таблиц.
3. Основные расчетные формулы.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов в нормальном и аварийном режимах при различных параметрах исследованных систем. Необходимые расчеты для построения диаграмм.
5. Общие выводы по свойствам систем с различными режимами нейтрали.

Образец формы таблицы с результатами измерений и расчетов

№ п/п	Исследуемая система и режим работы	Параметры системы	№ опыта	Результаты измерений							Расчетные данные		
				U_A	U_B	U_C	U_0	I_A	I_B	I_C		I_0	I_3
IV	Нейтраль заземленная через катушку индуктивности												
	1) нормальный режим												
	а) симметричное состояние	$C_A = C_B = C_C = 50 \text{ мкФ}$	7										
	б) несимметричное состояние	$C_A = 10 \text{ мкФ};$ $C_B = 30 \text{ мкФ};$ $C_C = 50 \text{ мкФ}$	8										
2) аварийный режим													
а) симметричное состояние	$C_A = C_B = C_C = 20 \text{ мкФ}$	9											
б) несимметричное состояние	$C_A = 20 \text{ мкФ};$ $C_B = 30 \text{ мкФ};$ $C_C = 40 \text{ мкФ}$	10											

Контрольные вопросы

1. Какие факторы являются определяющими при выборе режима работы нейтрали в электрических сетях?
2. Нормы токов короткого замыкания в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью.
3. Какой тип нейтрали применяется в установках 110 кВ и выше?
4. Какой тип нейтрали применяется в установках до 1 кВ?
5. Как определить параметры индуктивности при компенсации емкостных токов?
6. Какое напряжение будет испытывать изоляция при однофазном замыкании на земле в сетях с изолированной нейтралью?
7. Нормы на величины допустимых значений сопротивления заземляющих устройств в различных сетях.

Список литературы

1. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973.
2. А.А. Федоров, В.З. Каменева. Основы электроснабжения промышленных предприятия. – М.: Энергия, 1979.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ТЕМА: Исследование влияния установившегося отклонения напряжения сети на работу электроприемников

Цель работы: изучить влияние установившегося отклонения напряжения на работу асинхронных электродвигателей и ламп накаливания.

Краткие теоретические сведения

Потребители могут работать эффективно только при определенном качестве электрической энергии.

Показатели качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 13109-97 являются:

- установившееся отклонение напряжения Su_y ;
- размах изменения напряжения Su_t ;
- доза фликера P_f ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_u ;
- коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{u(n)}$;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2u} ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0u} ;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения Δt_n ;
- импульсное напряжение $U_{имп}$;
- коэффициент временного перенапряжения $K_{пер U}$.

В данной работе рассматривается только влияние на работу приемников установившегося отклонения напряжения δU_y .

Значение установившегося отклонения напряжения δU_y в процентах определяется по формуле:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где U_y – усредненное значение напряжения в течение расчетного периода, равного 24 ч;

$U_{ном}$ – номинальное междуфазное (для трехфазной сети) или фазное (для однородной сети) напряжение.

ГОСТ 13109-97 установлены следующие нормы для δU_y :

$\pm 5\%$ – нормально допустимые значения;

$\pm 10\%$ – предельно допустимые значения.

Если в сети при эксплуатации имеют место колебания напряжения, характеризующиеся размахом изменения напряжения δU_t , то предельно допустимое значение суммы δU_y и δU_t в точках присоединения к электрическим сетям 0,38 кВ не должно превышать $\pm 10\%$ от номинального напряжения.

Рассмотрим примеры влияния отклонений напряжения на работу отдельных электроприемников и на протекание технологических процессов.

В настоящее время наиболее распространенными электроприемниками в промышленности являются синхронные двигатели. В табл. 3.1 приведены данные по влиянию отклонений напряжения на характеристики электродвигателей.

Значительное влияние оказывает отклонение напряжения на протекание электротермических процессов.

Таблица 3.1

Характеристики двигателей	Изменение характеристик, %; при изменении напряжения	
	-10 %	+10 %
Пусковой и максимальный вращающий момент	-19,0	+21,0
Скольжение	+23,0	-17,0
Частота вращения при номинальной нагрузке	-1,5	+1,0
КПД при номинальной нагрузке	-2,0	+1,0
Ток ротора при номинальной нагрузке	+14,0	-11,0
Ток статора при номинальной нагрузке	+10,0	-7,0
Пусковой ток	-10,0... -12,0	+10,0... +12,0

Для оценки этого влияния рассмотрим один из примеров, приведенных в [1]. На одном из заводов при отжиге заготовок из цветного металла в печах сопротивлений общей мощностью 675 кВт, при снижении заготовок из цветного металла в печах сопротивлений общей мощностью 675 кВт, при снижении напряжения на 7 % технологический процесс продолжался 5 часов вместо 3 часов при номиналь-

ном напряжении. В таком же соотношении увеличивалось электропотребление. При снижении напряжения на 10 % технологический процесс был невозможен. Задержка отжига в электрических печах привела к удлинению всего технологического процесса. В результате имело место повышение себестоимости продукции. Годовой убыток из-за повышения издержек производства при удлинении технологического процесса составил более 11,4 тыс. у.е. (цены 2000 года).

Отклонение напряжения оказывает влияние и на электрическую сварку. Снижение напряжения ухудшает качество сварных швов. Цикл времени сварки при снижении напряжения на 10 % удлиняется примерно на 20 % (для прогрева швов). В таком же соотношении возрастает электропотребление.

Изменение напряжения оказывает влияние на работу батарей статических конденсаторов, реактивная мощность которых также пропорциональна квадрату подведенного напряжения. При частых повышениях напряжения наблюдается массовый выход из строя конденсаторов.

Отклонение напряжения существенно влияет на работу осветительных установок. От подведенного напряжения зависят световой поток F , освещенность E , срок службы N , потребляемая мощность P и КПД осветительных приемников электрической энергии.

Аналитические зависимости основных параметров для ламп накаливания, люминесцентных низкого давления и дуговых ртутных люминофорных (ДРЛ) приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Аналитическое выражение зависимости параметров ламп	Степенной показатель зависимости параметров ламп от величины напряжения		
	для ламп накаливания	для люминесцентных ламп низкого давления	для дуговых ртутных люминофорных ламп (ДРЛ)
Световой поток	$\alpha = 3,61$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$
Срок службы	$\varphi = -14$	$\varphi = -1,81$	$\varphi = -3,72$
Потребляемая мощность	$\nu = 1,58$	$\nu = 2,75$	$\nu = 1,78$

При повышении напряжения на 10 % срок службы ламп накаливания сокращается почти в 3 раза. Уменьшение напряжения на 10 % приводит к уменьшению светового потока ламп ДРЛ на 27 %, а ламп накаливания – более чем на 30 %.

Отсюда прямые убытки, связанные со стоимостью преждевременно перегоревших ламп, их заменой, а уменьшение освещенности

рабочих мест приводит к уменьшению производительности труда, быстрому утомлению глаз рабочих и браку продукции.

Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 3.1. Объектами исследования являются асинхронный двигатель и лампа накаливания. Тормозной момент на валу двигателя создается электромагнитным тормозом. Для регулирования напряжения используется трехфазный регулятор напряжения типа РНТ. Для измерения освещенности, создаваемой лампой накаливания, используется люксметр Ю116.

На стенде установлены необходимые коммутирующие аппараты, регулирующие и измерительные приборы.

Требование техники безопасности

В стенде используется трехфазный регулятор напряжения РНТ с напряжением 220 В, поэтому при регулировании необходимо соблюдать осторожность и не прикасаться к токоведущим частям. Запрещается производить какие-либо измерения в схеме под напряжением.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для проведения испытания асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 3.1).

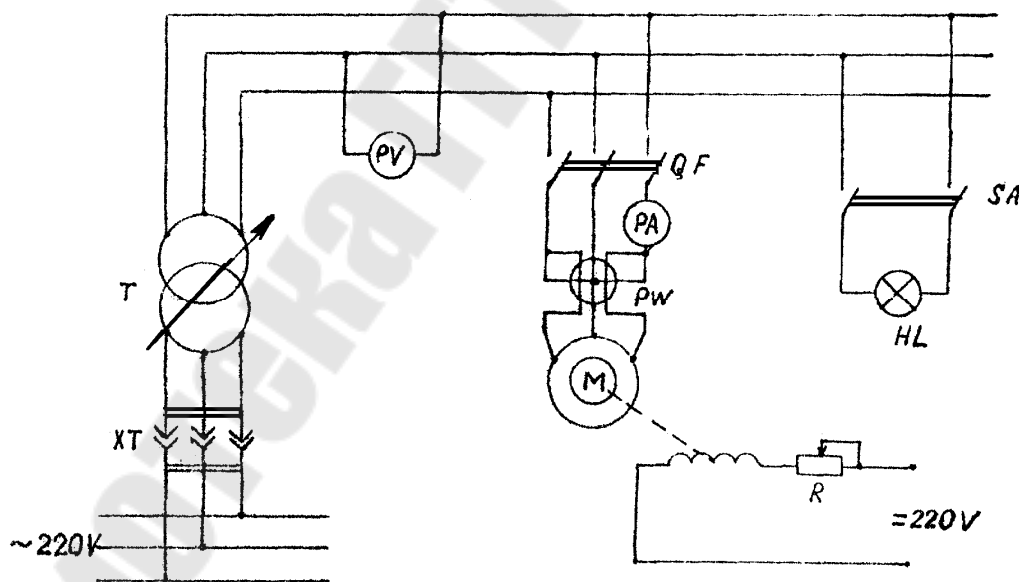


Рис. 3.1. Схема проведения опытов

2. Подать на зажим двигателя номинальное напряжение, измерить при номинальной нагрузке I_1 , M_n , P_1 , $\cos\varphi$, n . Измерить начальный пусковой момент $M_{п}$.

3. Подать на зажимы двигателя пониженное напряжение $U = 0,9 \cdot U_n$. Измерить при том же значении момента M_n величины I_1 ; P_1 ; $\cos\varphi$ и n . Определить начальный пусковой момент M_n .

4. Подать на зажимы двигателя повышенное напряжение $U = 1,1 \cdot U_n$, измерить при M_n величины I_1 ; P_1 ; $\cos\varphi$ и n . Определить начальный пусковой момент M_n .

5. Построить зависимости I_1 ; P_1 ; $\cos\varphi$, M_n и $n = f(U)$.

6. Включить лампу накаливания и измерить освещенность поверхности стола при $U = 1,1 \cdot U_n$ и $U = 0,9 \cdot U_n$.

7. Построить зависимость освещенности от U .

8. Рассчитать и построить зависимости (см. табл. 8.2) светового потока F , срока службы N и потребляемой мощности P от напряжения U для заданного преподавателем типа лампы.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Показатели качества электроэнергии.
3. Нормы для параметра δU_y .
4. Основные зависимости параметров отдельных электроприемников от величины δU_y .
5. Результаты измерений на стенде; построение графической зависимости на основе экспериментальных данных и по заданию преподавателя (для заданного типа ламп).
6. Выводы.

Литература

1. Карпов Ф.Ф., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электросетях промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1970.
2. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1979.

ЛАБОРАТОЯ РАБОТА № 4

Тема: Определение групп соединения трехфазных трансформаторов

Цель работы: изучение способов определения групп соединения трехфазных трансформаторов.

Теоретические сведения

Согласно ГОСТ силовые трансформаторы имеют стандартные схемы в группы соединения обмоток.

Обмотки высшего и низшего напряжения трехфазных трансформаторов допускают три основных способа соединений: звезда, треугольник, зигзаг.

Группа соединения трансформатора определяет угол сдвига между векторами вторичного и первичного линейных напряжений соответствующих обмоток. Смещение этих векторов, или угол между ними, зависит от схемы соединения обмоток и направления витков обмотки катушек, которое может быть левым или правым.

Соединяя обмотки высокого и низкого напряжения одним из способов, можно получить различные группы соединения трехфазных трансформаторов.

Для трехфазных трансформаторов применяют следующие группы соединения обмоток высшего и низшего напряжений:

$Y/Y-0$; $Y/\Delta-11$; Y/Y_0-0 ; $Y_0/\Delta-11$; $\Delta/\Delta-0$.

Обозначения $Y/Y-0$, $Y/\Delta-11$ и другие указывают схемы и группы соединения обмоток трансформаторов – угловое смещение векторов линейных напряжений обмотки низшего напряжения по отношению к векторам линейных напряжений обмотки высшего напряжения. Первый знак в обозначении относится к обмотке высшего напряжения, второй к обмотке низшего напряжения. Число указывает угловое смещение 0° , число 11 – угловое смещение 330° , так как угловое смещение в 30° принято за единицу.

На практике зачастую необходимо проверить группу соединения обмоток у готового трансформатора. Для этого могут использоваться следующие методы:

1. Метод непосредственного измерения угла между векторами линейных э.д.с. первичной и вторичной обмоток одноименных фаз с помощью фазометра.

2. Путем измерения электромагнитной системы соответствующих напряжений между зажимами обмоток высшего и низшего на-

пряжения. На основании измеренных данных строятся векторная диаграмма напряжения, по которой определяется группа соединения трансформатора.

Чтобы получить заданную группу соединений необходимо, прежде всего, определить начало и конец каждой из обмоток трансформатора.

Определение начала и конца каждой обмотки проводится методом постоянного тока или с помощью фазометра.

В настоящей работе используется метод постоянного тока, как наиболее простой широко применяющийся в практике. В основу этого метода положено сопоставление направления э.д.с, индуцируемых в обмотках высшего и низшего напряжения, расположенных на одном или разных стержнях трансформатора. Наведенные э.д.с. будет иметь одинаковое направление в том случае, если они направлены в любой момент времени в обеих обмотках от начала к концу или наоборот. Причем направление намотки витков обмоток должно быть одинаковым.

Прядок выполнения работы

1. Определение выводов обмоток трансформатора.
2. Определение начала и концов всех обмоток трансформатора методом постоянного тока.
3. Определение группы соединения обмоток трансформатора с помощью фазометра.
4. Определение группы соединения обмоток трансформатора с помощью вольтметра.

Методика проведения эксперимента.

Для определения начала и конца обмотки необходимо иметь источник постоянного тока напряжением 4-10 В и вольтметры магнитоэлектрической системы с двухсторонним отклонением стрелки. На приборах должна быть указана полярность зажимов.

1. *Определение выводов обмоток* может проводиться одним из следующих способов:

1.1. С помощью источника постоянного тока и амперметра (рис. 4.1). При подключении источника и амперметра к выводам одной обмотки (рис. 4.1, а) стрелка амперметра отклонится. В случае подключения к выводам различных обмоток (рис. 4.1, б) отклонения стрелки не последует, так как не будет электрической цепи для протекания тока.

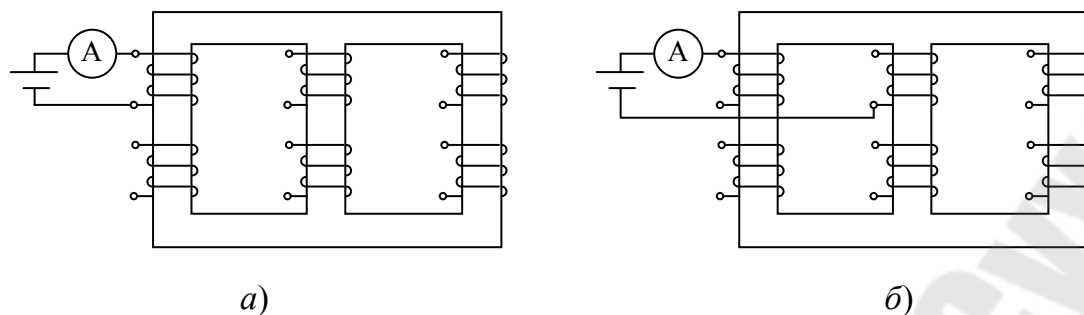


Рис. 4. 1. Определение выводов обмоток

1.2. С помощью мегомметра. При подключении мегомметра к выводам одной обмотки стрелка мегомметра покажет сопротивление обмотки. В случае подключения к выводам различных обмоток стрелка мегомметра покажет сопротивление равное бесконечности (сопротивление изоляции).

2. *Определение начала и концов обмоток* производится в следующем порядке:

2.1. Произвольно (условно) выбирается начало и конец одной из первичных обмоток.

К выбранной обмотке подключается источник постоянного тока и отмечается зажим, на который подан плюс источника. К остальным обмоткам подключаются вольтметры, как показано на рис. 4.2.

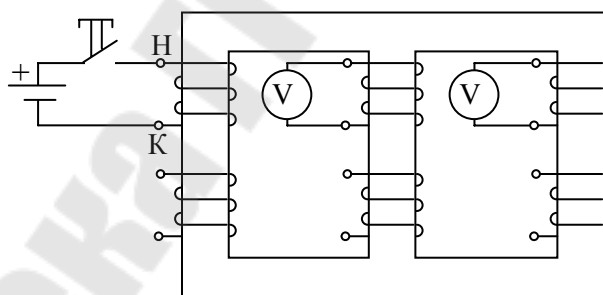


Рис. 4.2. Определение начала и концов обмоток

Включается на короткое время рубильник (нажимается кнопка) и регистрируются отклонения стрелок приборов.

Если зажимы приборов и источника с отметкой (+) подключены к началам всех обмоток трансформатора, то показания приборов, подключенных к обмоткам, расположенным на других стержнях трансформатора, окажутся отрицательными.

Объясняется это тем, что в обмотках, расположенных на одном и том же стержне, индуцируемая э.д.с. совпадает по направлению с э.д.с. исходной обмотки (направление витков обмоток при этом предполагается одинаковым). В обмотках, расположенных на других

стержнях, э.д.с. направлены навстречу э.д.с. исходной обмотки, так как для этих стержней изменилось направление магнитного потока.

2.2. Аналогично п. 2.1. определяются начала и концы вторичных обмоток.

2.3. Определяются первичные и вторичные обмотки, расположенные на одном стержне магнитопровода. Для этого собирается схема представленная на рис. 4.3. После подключения источника питания к одной из первичных обмоток (путем нажатия кнопки) стрелки вольтметров подключенных к вторичным обмоткам отклонятся. Максимальное отклонение стрелки будет у вольтметра включенного в обмотку расположенную на одном стержне с обмоткой, к которой подключен источник.

2.4. Проводится окончательная проверка. Для этого к одной из первичных обмоток подключается источник постоянного тока, (+) к началу обмотки. К вторичным обмоткам подключаются вольтметры, (+) к началу обмоток (рисунок 3).

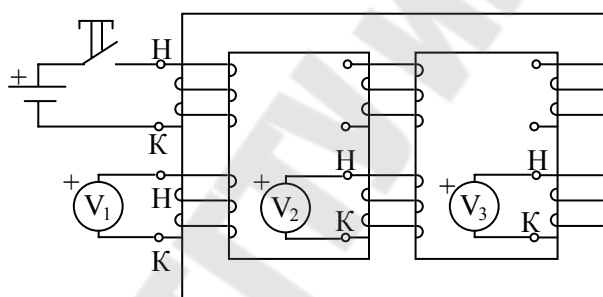


Рис. 4.3. Окончательная проверка правильности определения начала и конца обмоток

В случае правильного определения начала и концов обмоток стрелка первого вольтметра отклонится в положительную сторону (т.к. обмотки к которым подключен источник и первый вольтметр находятся на одном стержне, то магнитный поток, а, следовательно, и ЭДС в них совпадают), а стрелка второго и третьего вольтметра – в отрицательную (т.к. обмотки к которым подключен источник и второй (третий) вольтметр находятся на разных стержнях, то магнитный поток, а, следовательно, и ЭДС в них имеют противоположные направления).

Если показания всех приборов противоположны (это объясняется тем, что начала и концы обмоток, к которым подключался источник в п. 2.1, 2.2, выбирались условно), то требуется поменять маркировку (начало \Leftrightarrow конец) у всех первичных либо вторичных обмоток.

В случае недостаточного количества приборов можно производить поочередно определение начал и концов обмоток одним прибором (вольтметром магнитоэлектрической системы).

Результаты определения начал и концов обмоток записываются в тетрадь и показываются для проверки преподавателю.

3. Определение группы соединения обмоток трансформатора с помощью фазометра.

3.1. Преподавателем задается схема соединения обмоток трансформатора.

3.2. Для определения группы соединения обмоток трансформатора собирается схема согласно рис. 4.4.

Обмотка напряжения фазометра подключается к зажимам обмотки высшего напряжения трансформатора (например, к зажимам **A** и **B**).

Токовая обмотка фазометра подключается соответственно к одноименным зажимам обмотки низшего напряжения через добавочное сопротивление (в данном случае к зажимам **a** и **b**). Как видно на рисунке 4, ток I , протекающий через токовую обмотку фазометра будет совпадать по направлению с э.д.с. возникающей на выводах **a** и **b**. Протекающий по обмотке напряжения ток окажется одинакового направления с э.д.с, появляющейся на зажимах **A** и **B**. Следовательно, угол между токами будет равен углу между соответствующими линейными э.д.с. обмоток трансформатора.

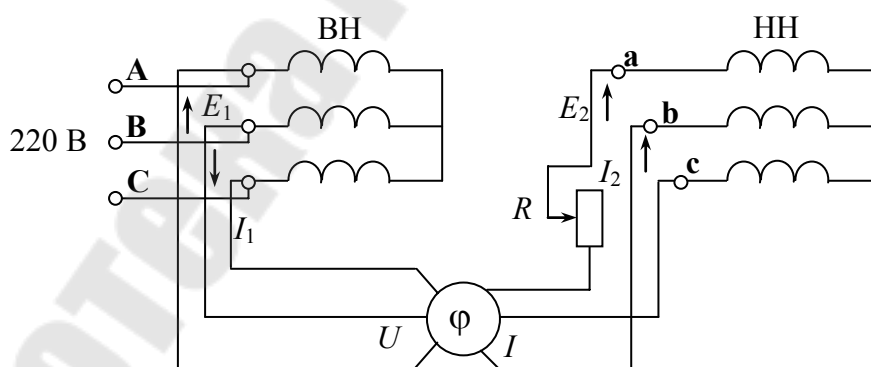


Рис. 4. 4

После измерения угла строится векторная диаграмма э.д.с. обмоток высшего и низшего напряжения и определяется группа соединения обмоток трансформатора.

Пользуясь указанным методом, желательно иметь фазометр со шкалой в 360° .

ПРИМЕЧАНИЕ: В случае применения трехфазного фазометра к обмоткам высшего напряжения трансформатора подключают три вывода обмоток напряжения к фазам А, В, С. Два вывода токовой обмотки фазометра подключаются соответственно к зажимам а и в обмотки низшего напряжения.

4. *Определение группы соединения обмоток трансформатора с помощью вольтметра.*

4.1. Преподавателем задается схема соединения обмоток трансформатора.

4.2. Применяя данный метод, соединяют одноименные зажимы, например А и а (рисунок 5) и производят измерения вольтметром между следующими выводами:

- | | | |
|-----------|-----------|----------|
| 1) b – В; | 3) с – В; | 5) А – В |
| 2) b – С; | 4) с – С; | 6) а – в |

Питание подается на обмотку высшего напряжения трансформатора.

В зависимости от группы соединения результаты измерений будут различными.

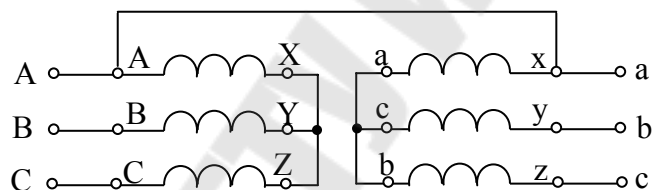


Рис. 4.5. Определение группы соединения обмоток трансформатора методом вольтметра

По данным измерений строится векторная диаграмма напряжений и определяется группа соединений трансформатора.

Определить эти же напряжения графически из совмещенных векторных диаграмм или рассчитать их по формулам, приведенным в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Соединение	$U_{\text{ВВ}}$	$U_{\text{ВС}}$
Y/Y - 12	$U(k-1)$	$U\sqrt{1-k+k^2}$
Y/Y - 6	$U(k+1)$	$U\sqrt{1+k+k^2}$
Δ/Y - 11	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{k^2+1}$
Соединение	$U_{\text{СВ}}$	$U_{\text{СС}}$
Y/Y - 12	$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U(k-1)$
Y/Y - 6	$U\sqrt{1+k+k^2}$	$U(k+1)$
Δ/Y - 11	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$

где U – напряжение обмотки НН;
 k – коэффициент трансформации (линейных напряжений).

Пример построения векторной диаграммы

Допустим в результате проведенного эксперимента по п. 4.2 получены следующие результаты:

$$B - b = 270 \text{ В}; \quad B - c = 200 \text{ В};$$

$$C - b = 300 \text{ В}; \quad C - c = 270 \text{ В}.$$

Линейное напряжение, подведенное из сети к обмотки высшего напряжения трансформатора составляет 220 В.

Выбираем следующий масштаб: 1 см = 50 В.

Строим в масштабе треугольник линейных напряжений для обмоток высокого напряжения (рисунок 6, а). Из точки **В** и **С** делаем засечки раствором циркуля, равным соответственно 270 В и 300 В в выбранном масштабе и получаем точку **в**. Из точек **В** и **С** раствором циркуля равным 200 и 270 В в прежнем масштабе делаем второй раз засечки и находим точку **с**. Точки **А** и **а** на диаграмме совпадают, так как соответствующие зажимы трансформатора были соединены коротко.

По наденным точкам строится треугольник линейных напряжений обмоток низшего напряжения. Выносим отдельно одноименные векторы линейных напряжений (например, $U_{\text{АВ}}$ и $U_{\text{ав}}$), представляющие собой жесткую систему, как показано на рисунок 6, б.

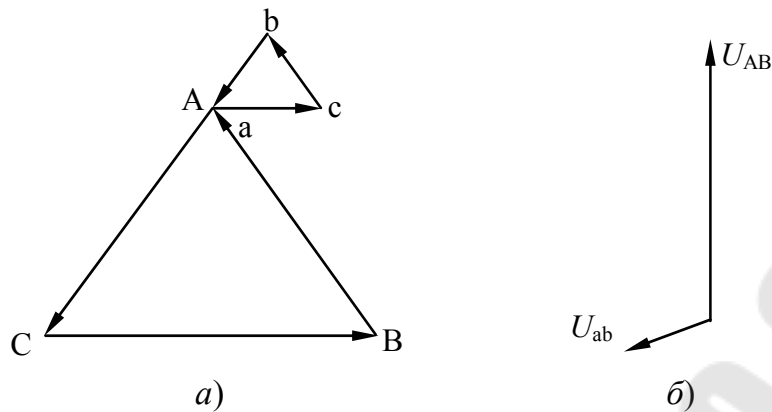


Рис. 4.6. Построение векторной диаграммы

Совместим мысленно вектор высшего напряжения U_{AB} с цифрой 12 циферблата часов, вектор низшего напряжения U_{ab} установится на цифре 8, Это означает, что испытуемый трансформатор имеет 8 группу соединения обмоток.

Меры безопасности

1. Не включать стенд без разрешения преподавателя.
2. Не проводить работы по монтажу схем при включенном стенде.
3. Не прикасаться к незащищенным частям стенда и измерительных приборов (клеммам) при включенном стенде.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткое описание проведенных экспериментов по определению начал и концов обмоток, и групп соединения обмоток трансформатора.
3. Результаты измерений и диаграммы.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как определить начала и концы обмоток?
2. Чем обуславливается кратковременное отклонение стрелки вольтметра (а не постоянное) при определении начала и концов обмоток трансформатора?
3. Что понимают под группой соединения обмоток трансформатора?
4. Почему (при выполнении п. 2.3) максимальное отклонение стрелки будет у вольтметра включенного в обмотку (вторич-

ную) расположенную на одном стержне с обмоткой (первичной), к которой подключен источник?

5. При каких условиях получают четные и нечетные группы соединения трансформаторов?
6. Как определить группу соединения трехфазного трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Тема: Определение параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора

Цель работы:

1. Изучить схемы замещения трансформаторов и методы определения их параметров.
2. Для трехобмоточного трансформатора, модель которого выполнена в виде схемы замещения:
 - а) провести опыты короткого замыкания и холостого хода;
 - б) рассчитать параметры схемы замещения трансформатора по результатам опыта.

Теоретическая часть

При расчете электрических сетей с трансформаторами, последние представляются в виде схем замещения.

Схемы замещения двухобмоточного трансформатора представлены на рисунке 1.

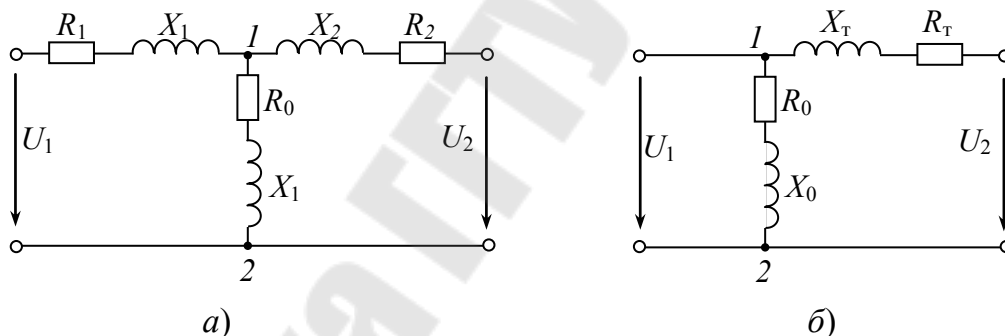


Рис. 5.1. Схемы замещения двухобмоточного трансформатора:
а) Т-образная; б) Г-образная.

Часто в схеме замещения ветвь намагничивания $I2$ (рис. 5.1) представляется в виде двух параллельных ветвей и характеризуется не магнитными сопротивлениями, а проводимостями (рис. 5.2).

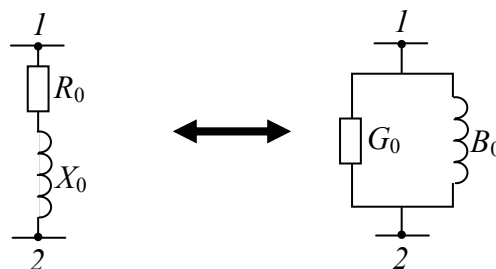


Рис. 5.2. Намагничивающая цепь схемы замещения

Трехобмоточные трансформаторы в расчетах представляют собой замещения в виде эквивалентной трехлучевой звезды (рис. 5.3). Проводимость трехобмоточного трансформатора включают со стороны луча обмотки трансформатора, подключенной к источнику питания.

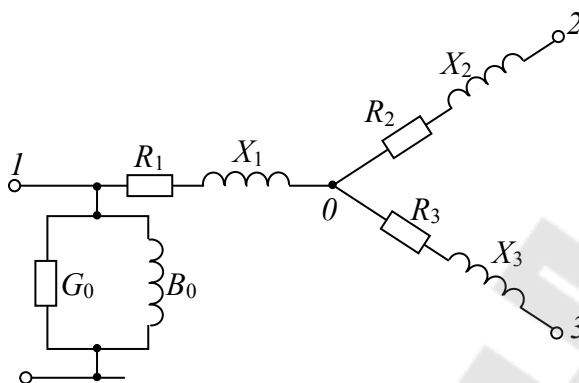


Рис. 5.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Опыт холостого хода. Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора производится по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Схемы опытов холостого хода однофазного ($m = 1$) и трехфазного ($m = 3$) двухобмоточных трансформаторов приведены на рис. 5.4. Первичная обмотка трансформатора подключается на синусоидальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Измеряются первичные напряжения $U_1 = U_0$, ток $I_1 = I_0$ и мощность $P_1 = P_0$, а также вторичное напряжение U_2 . Из данных опыта для однофазного трансформатора определяются полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода:

$$\begin{aligned} z_0 &= U_0 / I_0; \\ r_0 &= P_0 / I_0^2; \quad ; \\ x_0 &= \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

а так же коэффициент трансформации:

$$k = w_1 / w_2 \approx U_1 / U_2. \quad (5.2)$$

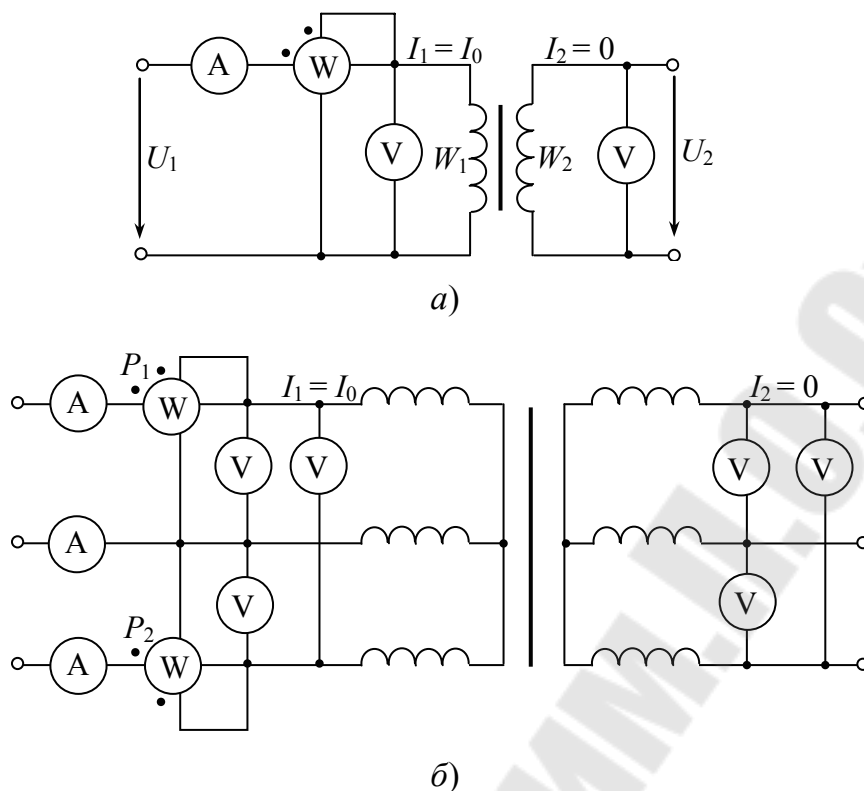


Рис. 5.4. Схемы опытов холостого хода однофазного (а) и трехфазного (б) двухобмоточных трансформаторов.

Для трехфазного трансформатора по показаниям трех амперметров и вольтметров определяются средние значения линейного тока I_0 и линейного напряжения U_0 , а по показаниям ваттметров – мощность холостого хода трех фаз $P_0 = P_1 + P_2$. Физический смысл имеют только значения сопротивлений, рассчитанные для фазы обмотки. Поэтому необходимо принять во внимание схему соединения обмотки. В случае соединения первичной обмотки в звезду

$$\begin{aligned}
 z_0 &= \frac{U_0}{\sqrt{3}I_0}; \\
 r_0 &= \frac{P_0}{3I_0^2}; \\
 x_0 &= \sqrt{z_0^2 - r_0^2},
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

а при соединении ее в треугольник

$$\begin{aligned}
 z_0 &= \frac{\sqrt{3}U_0}{I_0}; \\
 r_0 &= \frac{P_0}{I_0^2}; \\
 x_0 &= \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Опыт холостого хода для трехобмоточных трансформаторов проводится аналогично опыту холостого хода для двухобмоточных трансформаторов. Напряжение холостого хода подается на обмотку высокого напряжения, а обмотки среднего и низкого напряжения замыкаются.

Опыт короткого замыкания производится по схемам рис. 5.5. Вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам во избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы ток находился в пределах номинального.

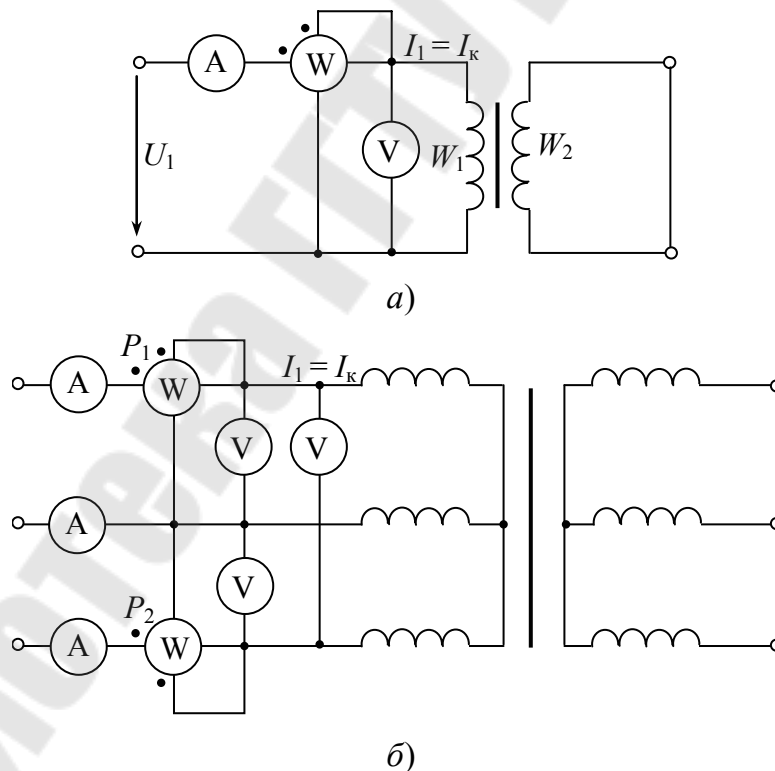


Рис. 5.5. Схемы опытов короткого замыкания однофазного (а) и трехфазного (б) двухобмоточных трансформаторов

Полное z_k , активное r_k и реактивное x_k сопротивления короткого замыкания рассчитываются по формулам, аналогичным для слу-

чая холостого хода.

Для однофазного трансформатора

$$\begin{aligned}z_{\text{к}} &= \frac{U_{\text{к}}}{I_{\text{к}}}; \\r_{\text{к}} &= \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{к}}^2}; \\x_{\text{к}} &= \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2}.\end{aligned}\quad (5.5)$$

Для трехфазного трансформатора по показаниям приборов определяются средние значения линейного напряжения $U_{\text{к}}$, линейного тока $I_{\text{к}}$ и мощности короткого замыкания трех фаз $P_{\text{к}}$. При соединении первичной обмотки в звезду параметры короткого замыкания на фазу будут следующие:

$$\begin{aligned}z_{\text{к}} &= \frac{U_{\text{к}}}{\sqrt{3}I_{\text{к}}}; \\r_{\text{к}} &= \frac{P_{\text{к}}}{3I_{\text{к}}^2}; \\x_{\text{к}} &= \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2},\end{aligned}\quad (6)$$

а при соединении первичной обмотки треугольником

$$\begin{aligned}z_{\text{к}} &= \frac{\sqrt{3}U_{\text{к}}}{I_{\text{к}}}; \\r_{\text{к}} &= \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{к}}^2}; \\x_{\text{к}} &= \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора $R_1, R_2, R_3, X_1, X_2, X_3$ (рис. 2.3) определяются из данных трех опытов короткого замыкания (рис. 5.6).

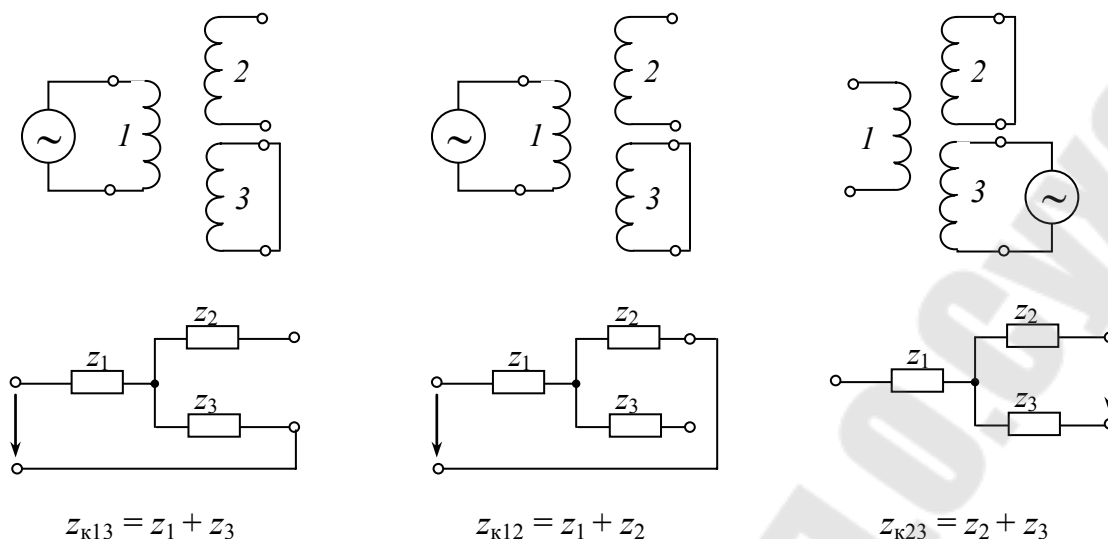


Рис. 5.6. Схемы опытов короткого замыкания трехобмоточного трансформатора

По выражению (5.6), (5.7) рассчитываются сопротивления короткого замыкания каждой пары обмоток.

$$\begin{aligned}
 z_{k12} &= z_1 + z_2 = r_{k12} + jx_{k12} = (r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2); \\
 z_{k13} &= z_1 + z_3 = r_{k13} + jx_{k13} = (r_1 + r_3) + j(x_1 + x_3); \\
 z_{k23} &= z_2 + z_3 = r_{k23} + jx_{k23} = (r_2 + r_3) + j(x_2 + x_3).
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Из выражения (5.8) можно найти

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \frac{z_{k12} + z_{k13} - z_{k23}}{2}; \\
 z_2 &= \frac{z_{k12} + z_{k23} - z_{k13}}{2}; \\
 z_3 &= \frac{z_{k13} + z_{k23} - z_{k12}}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

По аналогичным формулам через активные и индуктивные составляющие z_{k12} , z_{k13} , z_{k23} выражаются также r_1 , r_2 , r_3 и x_1 , x_2 , x_3 .

Приборы и оборудование

На лабораторном стенде (рис. 5.7) представлена модель трехфазного трехобмоточного трансформатора в виде схемы замещения, сопротивление которой выполнены в соответствующем масштабе.

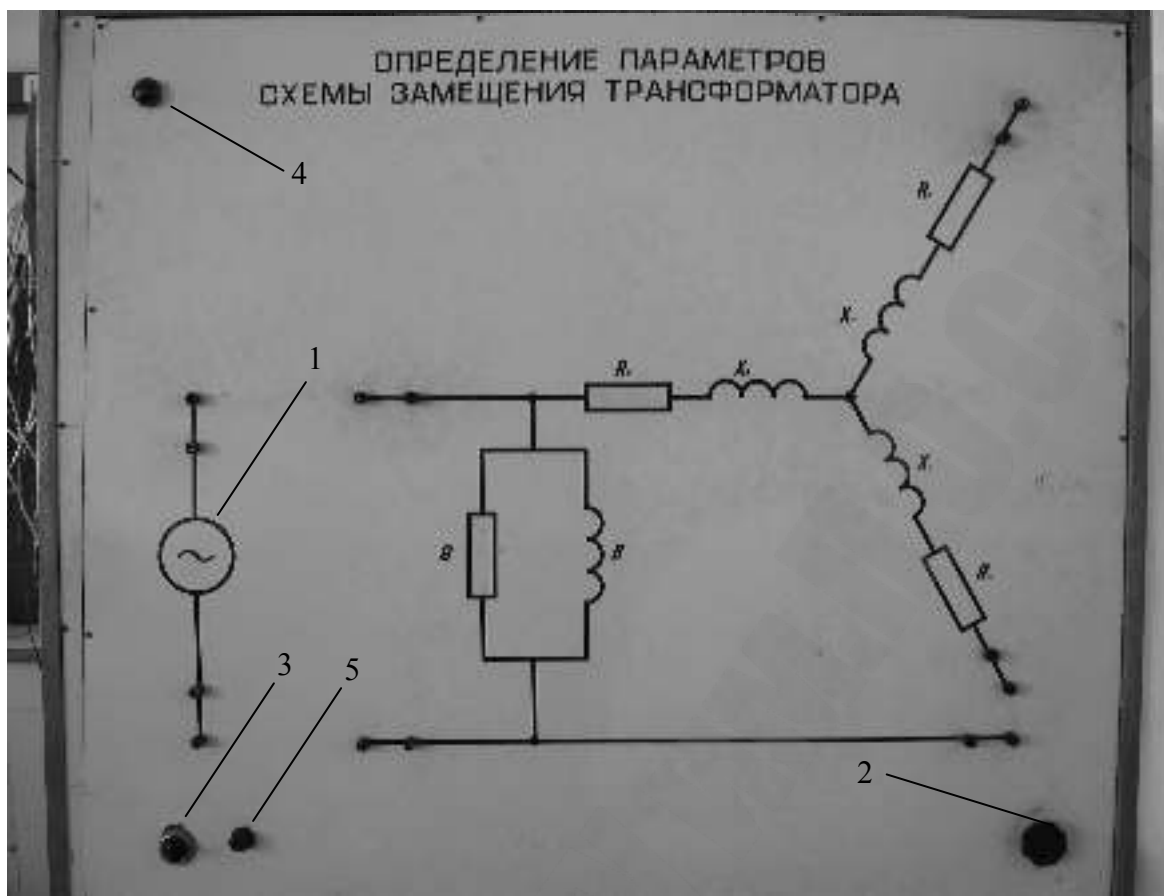


Рис. 5.7. Лицевая панель лабораторного стенда: 1 – источник питания; 2 – ручка ЛАТРА; 3 – тумблер включения/выключения питания; 4 – сигнальная лампа; 5 – гнездо для предохранителя

На панель стенда вынесены выводы сопротивлений модели и источника питания (ИП). Регулятор напряжения ИП находится в правом нижнем углу панели.

Порядок выполнения работы

1. Опыт короткого замыкания (КЗ)

Для трехобмоточного трансформатора опыт короткого замыкания проводится с каждой парой обмоток, при разомкнутой третьей обмотке (В – высокого, С – среднего или Н – низкого напряжения).

Для определения напряжения и потерь короткого замыкания для обмоток высокого и среднего напряжения ($U_{\text{КВС}}$ и $P_{\text{КВС}}$) собирается схема, согласно рис. 5.8.

Вращая по часовой стрелке ручку регулятора напряжения ИП, повышают напряжение, подаваемое на вход модели до величины, при которой в схеме будет протекать ток, равный номинальному (задается преподавателем).

Схема для проведения опытов по определению $U_{\text{КВН}}$, $P_{\text{КВН}}$ и $U_{\text{КСН}}$,

$P_{\text{кст}}$ составляются студентами самостоятельно и проверяется преподавателем. Измерения аналогичны первому опыту. Данные измерений заносятся в таблицу.

По результатам опыта КЗ рассчитываются параметры схемы замещения $R_{\text{в}}, R_{\text{с}}, R_{\text{н}}, X_{\text{в}}, X_{\text{с}}, X_{\text{н}}$ (рисунок 3).

2. Опыт холостого хода (ХХ)

Для измерения тока и потерь мощности холостого хода студентами самостоятельно собирается схема и проверяется преподавателем. Вращая по часовой стрелке ручку регулятора напряжения ИП, повышают напряжение до номинального значения (задается преподавателем) и замеряют ток и мощность холостого хода. Данные измерений заносят в таблицу.

Меры безопасности

4. Не включать стенд без разрешения преподавателя.
5. Не касаться токоведущих частей стенда при включенном питании.
6. Не включать токовые цепи приборов параллельно источнику питания.
7. Ток модели не должен превышать 2 А.

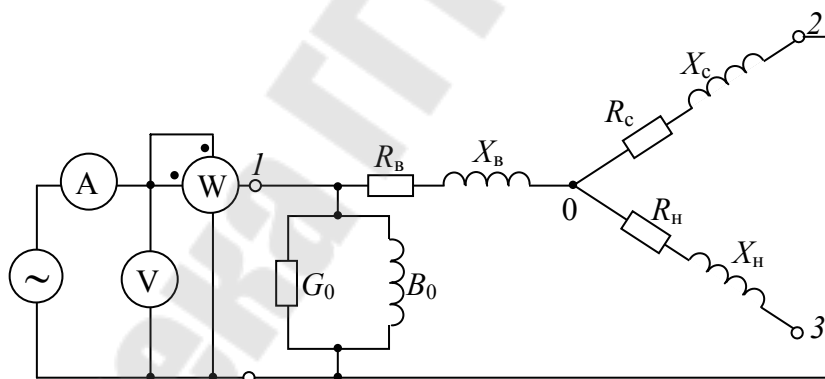


Рис. 5.8. Схема проведения опыта КЗ

Содержание отчета

2. Тема и цель работы.
3. Схемы проведения опытов.
4. Таблица с экспериментальными данными.
5. Расчет параметров схемы замещения.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как проводится опыт КЗ?
2. Порядок проведения опыта ХХ?
3. Какие параметры схемы замещения определяют по результатам опыта КЗ?
4. Какие параметры схемы замещения определяют по результатам опыта ХХ?
5. Какие физические явления, происходящие в трансформаторе при его работе, характеризуют параметры схемы замещения?

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 892 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Тема: Защита цеховых электрических сетей предохранителями и автоматическими выключателями

Цель работы:

1. Ознакомиться с типами и конструкцией автоматических выключателей.
2. Снять время-токовые характеристики автоматических выключателей.

Теоретические сведения

Для защиты и нечастой коммутации цепей постоянного и переменного тока применяются автоматические выключатели. Однако по сравнению с предохранителями, автоматические выключатели являются более совершенными аппаратами ввиду готовности к быстрым повторным включениям, возможности защиты от перегрузок в широком диапазоне токов, защиты электрических цепей при недопустимых снижениях напряжения, выполнения коммутационных операций (включение, отключение). Кроме того, у некоторых автоматов имеются независимые расцепители, позволяющие осуществить дистанционное отключение электрической цепи. Автоматы выпускаются в одно-, двух- и трехполюсном исполнении на токи до 6300 А при напряжении переменного тока до 660 В и постоянного тока до 1 кВ. По времени срабатывания различают: обычные неселективные автоматические выключатели с $t = 0,01 - 0,1$ с; селективные с регулируемой выдержкой времени до 1 с и быстродействующие, токоограничивающие с $t < 0,005$ с.

Автоматический выключатель состоит из корпуса, контактов с дугогасительной системой, привода, механизма свободного расцепления, расцепителей, вспомогательных контактов.

Основными элементами, при срабатывании которых автоматический выключатель отключается мгновенно или с выдержкой времени, являются расцепители. Автомат может иметь один или несколько расцепителей.

Электромагнитный расцепитель. Защиту от токов коротких замыканий выполняет электромагнитный расцепитель. Действие автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями основано на втягивании сердечника электромагнита при прохождении по его обмотке тока, величина которого превышает величину тока уставки. При этом усилие через толкатель передается на удерживаю-

щую защелку контакторной группы, в результате чего контакты под действием пружины размыкаются. Автоматические выключатели размыкают главную цепь приемника электроэнергии. В исходное положение контакты автоматических выключателей возвращаются вручную нажатием на рукоятку. Подвижные контакты при этом перемещаются к неподвижным. Электромагнитный расцепитель имеет свой ток отключения при КЗ (уставка КЗ). Этот ток выражается в амперах, или чаще, – в кратности к номинальному току.

Время срабатывания электромагнитного расцепителя при токе КЗ мгновенное (собственное время срабатывание расцепителя сотые доли секунд).

Электродинамический расцепитель. Используется для защиты от коротких замыканий в автоматах с большими номинальными токами. Срабатывание обеспечивается электродинамическими силами, отталкивающих силовые контакты.

Тепловой расцепитель. Защиту от токов перегрузок выполняет тепловой расцепитель. Основа теплового расцепителя – биметаллическая (в последнее время триметаллическая) пластина, которая при нагреве изменяет свою форму, и этим обеспечивает срабатывание расцепителя.

Работа автоматических выключателей с тепловыми расцепителями основана на изгибе биметаллических пластин под действием нагрева. При прохождении тока по нагревателю с активный сопротивлением количество выделенного в ней тепла пропорционально квадрату величины тока. Температура же этого нагревателя и соседней с ним пластины пропорциональна количеству выделенного тепла.

Биметаллическая пластина состоит из двух плотно соединенных слоев различных металлов, один из которых обладает малым коэффициентом теплового расширения (пассивный слой), другой – большим (активный слой). Поэтому прямая биметаллическая пластина при нагревании изгибается в сторону активного слоя. Когда по защищаемой электрической цепи проходит ток, величина которого превышает номинальную величину, в нагревательном элементе (активном сопротивлении) выделяется тепла больше, чем при номинальном токе, и биметаллическая пластина изгибается так, что незакрепленный конец ее через толкатель поднимает защелку. При этом пружина размыкает контакт. Роль нагревательного элемента (активного сопротивления) может выполнить и сама биметаллическая пластина. Тогда к одному ее концу подсоединяет провод сети, а к другому – провод приемника

электрической энергии. Скорость увеличения температуры (изгибания) биметаллической пластины пропорциональна величине тока.

Полупроводниковый расцепитель. Полупроводниковый расцепитель осуществляет защиту от токов коротких замыканий и перегрузок в цепи. В отличие от электромагнитного и теплового расцепителей полупроводниковый расцепитель допускает ступенчатый выбор параметров:

- номинального тока расцепителя;
- уставки по току срабатывания в зоне токов короткого замыкания;
- уставки по времени срабатывания в зоне токов перегрузки;
- уставки по времени срабатывания в зоне токов короткого замыкания;
- уставки по току срабатываний при однофазном коротком замыкании.

Для расцепителя в зоне токов перегрузки сигнал на срабатывание выдается с обратно зависимой от тока выдержкой времени (чем больше ток, тем меньше выдержка времени на отключение). Для расцепителя в зоне токов короткого замыкания, при значениях тока меньше предельного тока селективности, сигнал на срабатывание выдается с выдержкой времени. При значениях тока больше предельных токов селективности сигнал на отключение подаётся мгновенно. Также сигнал на отключение подается мгновенно, при не установленной выдержке времени.

Автоматы на основе таких расцепителей получают сигнал от измерительного устройства и формируют соответствующую защитную характеристику, выдающую сигнал через промежуточное реле на независимый расцепитель.

Автоматические выключатели характеризуются: номинальным напряжением и током автомата, номинальным током расцепителя, током трогания или током срабатывания автомата, предельным током отключения автомата (отключающая способность), собственным временем срабатывания, защитной (время-токовой) характеристикой (рис. 6.1).

Наименьший ток, вызывающий отключение автоматического выключателя, называют *током трогания* или *током срабатывания*, а настройку расцепителя автоматического выключателя на заданный ток срабатывания – *уставкой тока срабатывания*.

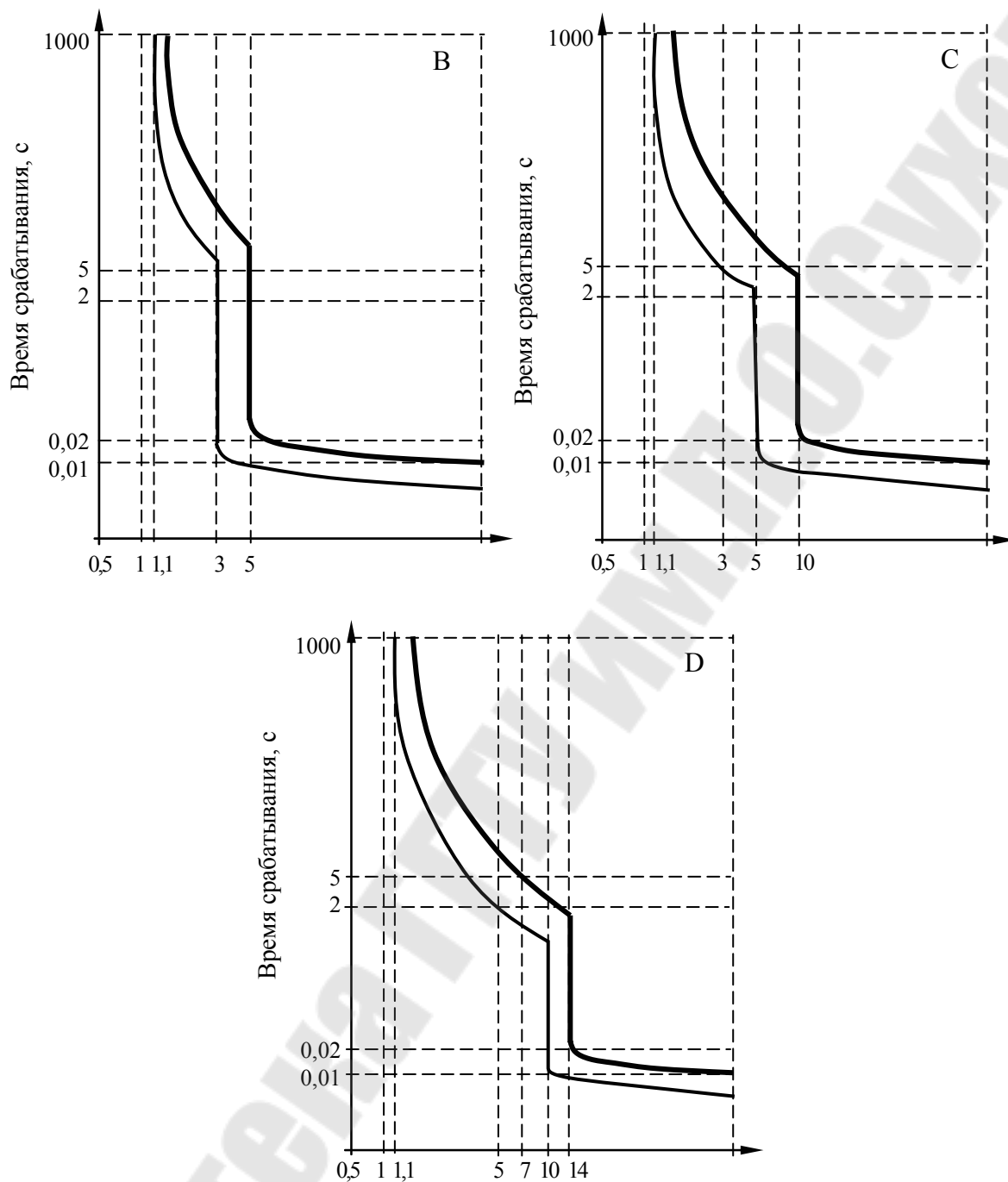


Рис. 6.1. Время-токовые характеристики автоматического выключателя серии ВА47-29

Выключатели изготавливаются со следующими **дополнительными сборочными единицами** (только те марки, для которых это предусмотрено):

- свободными контактами (СК), (определяют положение автомата (вкл/выкл.);
- вспомогательными контактами сигнализации автоматического отключения (ВСК), (сигнализируют срабатывание защиты автомата);

- электромагнитным приводом (ЭП);
- независимым расцепителем (НР), (обеспечивает отключение выключателя при подаче на катушку независимого расцепителя напряжения);
- нулевым расцепителем (РНН), (обеспечивает отключение выключателя без выдержки времени при напряжении на выводах его катушки ниже 0,1-0,35 номинального (в зависимости от марки автомата) и препятствует включению выключателя при напряжениях на выводах катушки 0,1 номинального и ниже);
- минимальным расцепителем (РМН), (обеспечивает отключение выключателя без выдержки времени при напряжении на выводах его катушки ниже 0,35-0,7 номинального (в зависимости от марки автомата) и препятствует включению выключателя при напряжениях на выводах катушки 0,35 номинального и ниже);
- дополнительным кожухом (для увеличения степени защиты автомата от окружающей среды);
- блокировкой положения «включено» и «отключено» замком;

По способу присоединения автоматы делятся на стационарные и выдвижные. Стационарные автоматы по способу монтажа могут быть как переднего присоединения, так и заднего. Переднее присоединение бывает как с креплением на din-рейке, так и с креплением винтами или болтами.

Автоматические выключатели выпускаются различных серий, некоторые из них приведены ниже: АВ; ВА; АЕ; АП; АЗ700; АВМ; «Электрон».

Автоматический выключатель серии АВ50-45 (рис. 6.2) предназначен для комплектации устройств защитного отключения и установок промышленного назначения. Оснащен микропроцессорным полупроводниковым расцепителем на номинальные токи 630 А, 1000 А, 1600 А, 2500 А, 3200 А. Уставки по току срабатывания в зоне токов короткого замыкания от 1,5 до 7 кратной величины от номинального тока с шагом 0,5. Уставки номинального тока регулируются от 0,3 его величины и выше. Автомат может быть дополнительно оснащен независимым расцепителем, регулируемым или нерегулируемым минимальным расцепителем напряжения.

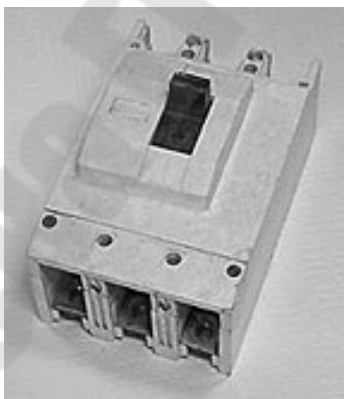


Рис. 6.2. Автоматический выключатель серии АВ50-45

Автоматические выключатели типа ВА51-25 (рисунок 3) предназначены для защиты электрических цепей от токов перегрузки и токов короткого замыкания и для коммутации электрических цепей в нормальном режиме напряжением до 660В переменного тока частоты 50, 60 Гц, а также для оперативных включений и отключений указанных электрических цепей с частотой до 30 включений в час.



ВА51-25



ВА 51-35



ВА 51-39

Рис. 6.3. Автоматические выключатели типа ВА

Автоматические выключатели типа АЕ2033ММ (рис. 6.4) предназначены для защиты электрических цепей от токов короткого замыкания, а выключатели типа АЕ2036ММ – для защиты от токов перегрузки и от токов короткого замыкания; для защиты, пуска и останова асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором; для коммутации электрических цепей в нормальном режиме напря-

жением до 380В переменного тока частоты 50, 60 Гц, а также для оперативных включений и отключений указанных электрических цепей с частотой до 30 включений в час.

Автоматические выключатели серии А 3700 представлены на рис. 6.4.



Рис. 6.4. Автоматические выключатели типа АЕ

Выключатели серии А 371Х Ф, А 371Х Б предназначены для проведения тока в нормальном режиме и отключения тока при коротких замыканиях, перегрузках, недопустимых снижениях напряжения,

а также до 3 оперативных включений и отключений электрических цепей в час и рассчитаны для эксплуатации в электроустановках с номинальным рабочим напряжением до 380/660 В переменного тока частоты 50, 60 Гц, до 380 В переменного тока частоты 400 Гц и постоянного тока до 220/440 В.



Рис. 6.5. Автоматические выключатели А 3700

Выключатели серии А 37ХХ БР предназначены для проведения тока в нормальном режиме и отключения тока при коротких замыканиях, перегрузках, недопустимых снижениях напряжения, а также до 6 оперативных включений и отключений электрических цепей в час и рассчитаны для эксплуатации в электроустановках с номинальным рабочим напряжением до 380/660 В переменного тока частоты 50, 60 Гц и постоянного тока до 220/440 В.



Рис. 6.6– Автоматический выключатель серии АП-50Б

Автоматические выключатели серии АП-50 Б (рис. 6.6) предназначены для защиты от перегрузок и коротких замыканий электриче-

ских цепей напряжением до 220 В постоянного тока, до 500 В переменного тока частоты 50-60 Гц, оперативных включений и отключений указанных цепей с частотой до 30 включений в час, в том числе для пуска, защиты и отключения электродвигателей.

Максимальные расцепители тока: М – электромагнитный; Т – тепловой. Дополнительные расцепители: Н – минимальный расцепитель напряжения; Д – независимый расцепитель; О – максимальный расцепитель тока в нулевом проводе.

Описание стенда для испытания выключателей

Стенд позволяет снять время-токовые характеристики автоматических выключателей и плавких предохранителей. На стенде установлены автоматические выключатели и имеются гнезда для плавких предохранителей.

Силовая часть стенда содержит магнитный пускатель КМ для подачи напряжения на стенд, трансформаторы Т1 (ЛАТР), Т2 (нагрузочный), обеспечивающие установку необходимой величины тока, испытуемые выключатели и предохранители. Кнопки SB1, SB2 и ручьявка автотрансформатора Т1 выведены на лицевую панель стенда.

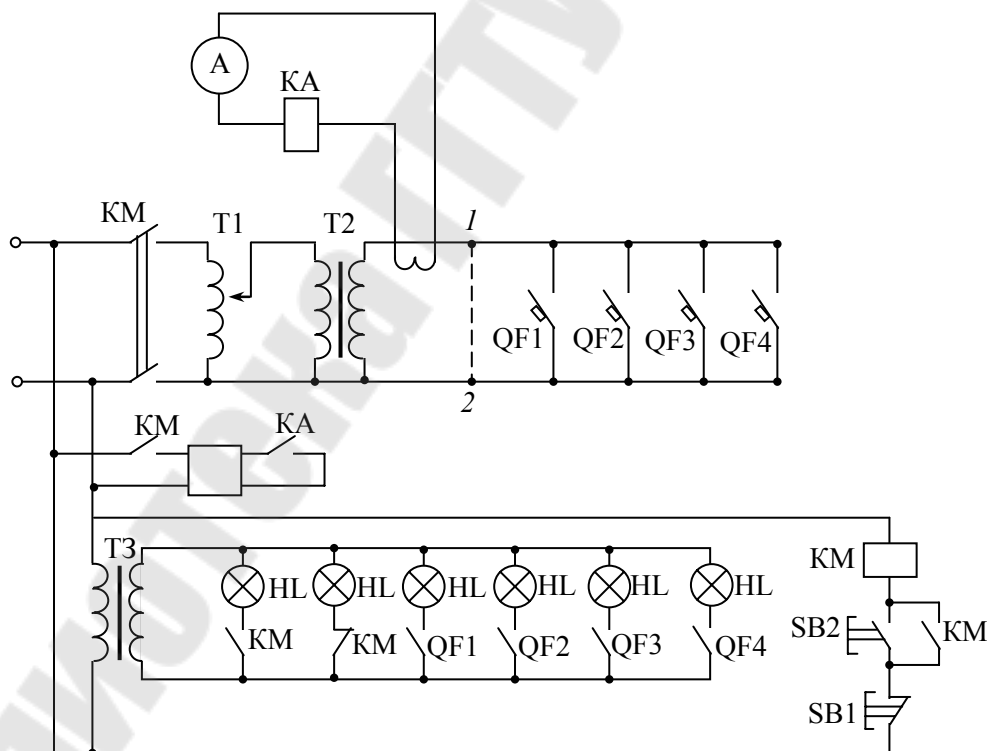


Рис. 6.7. Принципиальная схема стенда

Необходимую величину напряжения и тока устанавливают при зашунтированных выключателях или предохранителях, для чего меж-

ду точками 1, 2 устанавливается переключатель (провод большого сечения).

Цепи измерения, управления и сигнализации содержат амперметр, реле тока КА, секундомер и лампочки сигнализации НЛ включенного положения пускателя КМ и испытуемых выключателей QF1-QF4. Принципиальная схема стенда приведена на рис. 6.7.

Порядок выполнения работы

1. У выключателя, который предназначен для разборки, снимите крышку и ознакомьтесь с его устройством. При замкнутых контактах нажмите отверткой на биметаллическую пластину так, чтобы защелка освободилась, и проследите за работой рычажного механизма при размыкании контактов.

2. С одним из автоматических выключателей произведите снятие зависимости $t(I)$, для этого:

а) по схеме рисунок 7 между точками (клеммами) 1 и 2 установите переключатель и кнопкой SB2 "ПУСК" включите стенд. При этом секундомер и автоматические выключатели, установленные на стенде должны быть отключены;

б) плавным поворотом рукоятки автотрансформатора установите ток, равный 80 А;

в) после установки необходимой величины тока отключите стенд и снимите переключатель, включите секундомер и испытуемый автоматический выключатель, при этом должна загореться сигнальная лампа, установленная над выключателем $t_{ср}$;

г) кнопкой SB2 "ПУСК" включите стенд. Определите по секундомеру время срабатывания тепловых и электромагнитных расцепителей автоматического выключателя;

д) полученные результаты занесите в таблицу 1.

Подсчитайте кратность перегрузки:

$$K_{п} = I_{н} / I_{нв},$$

где $I_{н}$ – ток нагрузки, А;

$I_{нв}$ – номинальный ток испытуемого выключателя, А.

Таблица 6.1

Наименование автоматического выключателя	Номинальный ток аппарата	Ток нагрузки	Кратность перегрузки	Время срабатывания

е) отключите стенд и секундомер. Установите переключку между точками 1 и 2. Включите стенд плавным поворотом рукоятки автотрансформатора установите ток, равный 90 А. Прodelайте все согласно пунктам в-д. Затем увеличьте ток до 100 А, 110 А, 120 А и т.д. и определите время срабатывания испытуемого автоматического выключателя. После подсчета величины $K_{п}$ постройте время-токовую характеристику.

Для снятия время-токовых характеристик плавких предохранителей необходимо заготовить 6-8 плавких вставок одного номинала. Снятие характеристик производится так же как и для автоматических выключателей согласно пункту 2.

Меры безопасности

4. Не включать стенд без разрешения преподавателя.
5. Не проводить работы по монтажу схем при включенном стенде.
6. Не прикасаться к неизолированным частям стенда и измерительных приборов (клеммам) при включенном стенде.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Электрическая схема рис. 6.7 с перечнем приборов и оборудования и таблица 1.
3. График зависимости $t_{ср} = f(I_{н})$ для испытуемых автоматических выключателей.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы расцепителей.
2. Поясните принцип работы электромагнитного расцепителя.
3. Поясните принцип работы теплового расцепителя.
4. Поясните принцип работы полупроводникового расцепителя.
5. Нарисуйте время-токовую характеристику автомата и покажите на ней его основные параметры.
6. Для чего предназначен нулевой расцепитель?
7. Для чего предназначен минимальный расцепитель?
8. Для чего предназначен независимый расцепитель?
9. Для чего предназначен дифференциальный расцепитель?
10. Что понимают под током отсечки автомата? Чему равен ток отсечки испытуемых выключателей?
11. Опишите работу схемы представленной на рис. 6.7.

Список литературы

1. Елкин В.Д., Елкина Т.В. Электрические аппараты. – Мн.: Дизайн ПРО, 2003. – 168 с.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: – Энергоатомиздат, 1988, – 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Тема: Расчет электрических нагрузок по коэффициенту расчетной активной мощности

Цель работы: изучение метода упорядоченных диаграмм для определения расчетных нагрузок заводских потребителей, приобретение практических навыков при выполнении расчетов с применением ЭВМ и пакета EXCEL.

1. Краткие теоретические сведения

Существует ряд методов определения электрических нагрузок (определение нагрузок по заданному графику нагрузок, коэффициента спроса, упорядоченных диаграмм и т.д.).

Одним из основных универсальных методов определения расчётных электрических нагрузок является метод упорядоченных диаграмм, предложенный Каяловым Г.М.

Расчёт электрических нагрузок основывается на опытных данных и обобщениях, выполненных с применением методов математической статистики и теории вероятности.

Сущность метода заключается в установлении аналитической связи между расчётной мощностью и показателями работы определённых электрических приёмников. Эта зависимость получена на основании систематического применения кривых распределения или упорядоченных диаграмм для значения групповой нагрузки. Диаграммы определяются из опыта для наиболее загруженных смен каждого отдельного приёмника электрической энергии.

Согласно методу упорядоченных диаграмм, расчётная нагрузка для группы электроприёмников определяется по формуле:

$$P_p = K_p \cdot P_c \quad (7.1)$$

где K_p – расчетный коэффициент активной мощности;

P_c – средняя нагрузка группы электроприёмников, кВт;

Средняя мощность P_c силовых электроприемников определяется путем умножения установленных мощностей ЭП $p_{номi}$ на значения коэффициентов использования $k_{иi}$:

$$P_c = \sum k_{иi} \cdot p_{номi} \cdot \quad (7.2)$$

Средняя реактивная мощность

$$Q_c = \sum k_{\text{и}i} \cdot p_{\text{ном}i} \cdot \text{tg}\varphi_i, \quad (7.3)$$

где $\text{tg}\varphi_i$ – коэффициент реактивной мощности, соответствующий средневзвешенному коэффициенту мощности $\cos\varphi_i$, характерному для i -го ЭП данного режима работы.

Величина расчетного коэффициента активной мощности K_p определяется по справочным данным или специальным кривым, в зависимости от эффективного числа приёмников электроэнергии $N_э$, группового коэффициента использования по активной мощности и постоянной нагрева T_0 выбираемого элемента сети – $K_p = f(K_{\text{и}}, N_э)$.

Принимаются следующие значения постоянных времени нагрева:

$T_0 = 10$ мин – для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные пункты и шинопроводы, сборки, щиты;

$T_0 = 2,5$ ч – для магистральных шинопроводов и цеховых трансформаторов;

$T_0 \geq 30$ мин – для кабелей напряжением 6-10 кВ, питающих цеховые трансформаторы, распределительные подстанции и высоковольтные электроприёмники. При этом расчетная мощность принимается равной средней, т.е. $K_p = 1$.

Эффективным числом электроприёмников называется такое число электроприёмников одинаковой мощности, которое обуславливают ту же величину расчётной нагрузки, что и группа электроприёмников различных по мощности и режиму работы. Эффективное число электроприёмников есть отношение квадрата суммы мощностей электроприёмников к сумме их квадратов:

$$N_э = \frac{(\sum p_{\text{ном}})^2}{\sum p_{\text{ном}}^2}. \quad (7.4)$$

Групповой коэффициент использования $K_{\text{и}}$ активной мощности определяется по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{и}i} \cdot p_{\text{н}i}}{\sum_{i=1}^n p_{\text{н}i}}. \quad (7.5)$$

Расчётная реактивная нагрузка электроприёмников определяется по формуле:

$$Q_p = L_p \cdot \sum Q_c, \quad (7.6)$$

где L_p для реактивной нагрузки принимаются следующими:

$$L_p = 1,1 \text{ при } N_\Sigma \leq 10, \quad L_p = 1,0 \text{ при } N_\Sigma > 10. \quad (7.7)$$

Для магистральных шинопроводов и цеховых трансформаторов, а также для кабелей 6-10 кВ, питающих цеховые трансформаторы, распределительные подстанции и высоковольтные электроприемники

$$L_p = 1.$$

Полная расчётная мощность и расчетный ток:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}; \quad (7.8)$$

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}. \quad (7.9)$$

Пиковой (ударной) нагрузкой называется максимально возможная нагрузка одного или группы электроприемников длительностью в доли или несколько секунд. Такие нагрузки возникают при пусках или самозапущах двигателей трехфазного и постоянного тока, работающих в крановых, тяговых, прокатных приводах, а также при эксплуатационных коротких замыканиях, характерных для электросварки и дуговых печей.

Величину пикового тока используют при выборе устройств защиты и их уставок, в расчетах колебаний напряжения и при проверке самозапуска двигателей.

С достаточной для практических расчетов точностью групповой пиковый ток $I_{\text{пик}}$

$$I_{\text{пик}} = i_{\text{пуск.нб}} + I_p - k_{\text{и.нб}} \cdot i_{\text{ном.нб}},$$

где I_p – расчетный ток всех электроприемников, питающихся от данного элемента А;

$i_{\text{пуск.нб}}, i_{\text{ном.нб}}$ – наибольший пусковой ток электроприемника и номинальный ток этого электроприемника в группе, А;

$k_{\text{и.нб}}$ – коэффициент использования электроприемника, о.е.

2. Краткая характеристика книги ЛР-2 для расчета

Книга ЛР-2 позволяет выполнить расчет электрических нагрузок по методу упорядоченных диаграмм. Книга содержит следующие листы, в которых размещаются исходные данные, справочная информация, расчетные выражения и результаты расчета, а именно:

Лист "Данные по ЭП" – содержит таблицу-список электрооборудования и справочную информацию по электроприемникам. Кроме того, на листе формируется пользователем таблица-список групп электроприемников, содержащая наименования групп и диапазоны номеров электроприемников, входящих в эти группы.

Лист "Расчет" – содержит расчетные формулы для определения нагрузки по заданной пользователем группе электроприемников. Кроме наименования расчетной группы пользователь должен задать (в случае необходимости) номинальное напряжение электроприемников и признак узла нагрузки:

- 1 – для сетей до 1 кВ;
- 2 – для шин ЦТП и магистральных шинопроводов;
- 3 – для шин и кабелей 6кВ и выше.

Лист "**Результат**" – служит для размещения результата расчета в виде конечных цифр после выполнения макрокоманды "Расчет".

Лист " **K_p для сетей 1000В**" – содержит справочную таблицу со значениями коэффициента расчетной нагрузки $K_p(N_z, K_n)$ для сетей 0,4кВ по коэффициенту использования K_n и числу эффективных электроприемников N_z .

Лист " **K_p для ЦТП до 1кВ**" – содержит справочную таблицу со значениями коэффициента расчетной нагрузки $K_p(N_z, K_n)$ для расчета нагрузок цеховых трансформаторных подстанций и магистральных шинопроводов до 1кВ.

Лист " **K_0 для РП и ГПП**" – содержит справочную таблицу со значениями коэффициента одновременности для расчетной нагрузки $K_0(K_n, N)$ по средневзвешенному коэффициенту использования и количеству присоединений. Коэффициент K_0 используется для расчета нагрузок шин распределительных пунктов и ГПП напряжением 6-10кВ.

Лист "Вспомогательные вычисления" – содержит расчетные выражения для определения коэффициента использования K_n по N_z с использованием метода линейной интерполяции при N_z отличных от целых значений.

Ограничения на расчеты: кол-во электроприемников – до 100; кол-во групп - до 100.

Рабочее задание

1. Подготовить исходные данные в соответствии с вариантом задания.

2. Занести исходные данные в книгу ЛР-2.XLS, сформировать группы электроприемников расчетная нагрузка которых будет определяться и выполнить расчет.
3. Получить распечатку результатов расчета.

Ход работы:

1. Загрузить программу EXCEL и открыть книгу ЛР-2.xls. На листе книги "Данные по ЭП" заполнить исходные данные раздела "Параметры электрооборудования" в соответствии с графами таблицы (см. табл.1). Предварительно электроприемники должны быть сгруппированы по группам, электроприемники одной группы должны следовать друг за другом.

Таблица 7.1

Параметры электрооборудования									Группы потребителей		
№ п/п	№ по плану	Наименование оборудования	Кол-во	P_n , кВт	K_n , о.е.	$\cos\varphi$ о.е.	I_n , А	I_n/I_n , о.е.	Наименование	Эл. пр-ки	
										с	по
1	1а	Вентилятор	1	22,00	0,65	0,87	42,7	6	Группа-1 ШС-4	1	2
2	1б	Вентилятор	1	22,00	0,65	0,87	42,7	6			
3	2	Вентилятор	1	40,00	0,65	0,9	54,2	7	Группа-2 ШС-13	3	7
4	3	Вентилятор	1	55,00	0,65	0,88	103	6,5			
5	4	Ворошитель	1	15,00	0,6	0,91	28,3	7,5			
6	5а	Шнек	1	3,00	0,6	0,82	16,4	6,5			
7	5б	Шнек	1	3,00	0,6	0,82	16,4	6,5			
8	6	Экстрактор	1	11,00	0,6	0,82	22	6,5	Группа-3 ШС-14	8	13
9	7	Сито	1	7,50	0,6	0,88	14,8	6,5			
10	8а	Транспортер	1	10,00	0,6	0,85	15,7	7,5			
11	8б	Транспортер	1	10,00	0,6	0,85	15,7	7,5			
12	9а	Транспортер	1	3,00	0,6	0,82	6,7	6,5			
13	9б	Транспортер	1	3,00	0,6	0,82	6,7	6,5	Цех	1	13

2. Заполнить раздел "Группы потребителей" таким образом, чтобы в первой строке группы приемников были указаны:
 - наименование группы (обычно тип силового пункта или шкафа с номером, если они неизвестны, то можно назвать "Группа-1" и т.д.);
 - номер первого электроприемника в группе согласно сквозной нумерации раздела "Параметры электрооборудования";
 - номер последнего электроприемника в группе согласно сквозной нумерации раздела "Параметры электрооборудования".
 Чтобы определить все электроприемники как одну группу в по-

следней строке таблицы в соответствующих колонках необходимо указать название цеха, номер первого электроприемника и номер последнего.

3. Используя элементы форматирования и оформления оформить таблицу с исходными данными в удобном для восприятия виде.
4. Переключиться на лист "*Расчет*", указать в соответствующих клетках
 - 4.1. Признак узла нагрузки:
 - 1 – для сетей до 1 кВ;
 - 2 – для шин ЦТП и магистральных шинопроводов;
 - 3 – для шин и кабелей 6кВ и выше.
 - 4.2. Номинальное напряжение сети U_n , кВ.
 - 4.3. Наименование узла нагрузки. Узел нагрузки должен быть указан в абсолютном соответствии с наименованием в таблице исходных данных раздела "Группы потребителей". Для того, чтобы избежать ошибок, необходимо в соответствующей клетке записать формулу со ссылкой на клетку в которой содержится название группы. Это можно сделать следующим образом:
 - набрать символ формулы '=';
 - переключиться на лист "*Данные по ЭП*" щелкнув мышью по соответствующей закладке в списке листов книги;
 - указать курсором на клетку с названием группы, подлежащей расчету (при этом в строке формул появиться адрес ссылки на указанную ячейку);
 - закончить ввод формулы нажатием "Enter" на клавиатуре или в строке формул.
5. После ввода наименования узла нагрузки (группы) EXCEL автоматически рассчитает параметры электропотребления для данной группы. Необходимо убедиться в том что расчет выполнен для электроприемников, входящих в эту группу. Если расчет выполнен верно, то необходимо запустить на выполнение макрокоманду "Расчет" (макрокоманда может быть выполнена при нажатии клавиш Ctrl+R или из меню **СЕРВИС\МАКРОС\ВЫПОЛНИТЬ**). Данная макрокоманда копирует расчетную таблицу на лист "*Результат*" и удаляет пустые строки.
6. Повторить выполнение п.5. для других групп потребителей включая цех.

7. Вывести исходные данные и результаты расчета на печать. Предварительно необходимо в разделе ПАРАМЕТРЫ СТРАНИЦЫ задать параметры печати:
 - 7.1. СТРАНИЦА – *ориентация* альбомная или книжная, *масштаб* – разместить не более чем на 1 страницу;
 - 7.2. ПОЛЯ – использовать предлагаемые по умолчанию или подобрать другие;
 - 7.3. КОЛОНТИТУЛЫ – создать верхний колонтитул, в левой части которого указать номер учебной группы, в средней – фамилию и.о. студента, в правой установить код формирования даты.
8. Вывести лист результата на печать. Пример результата расчета приведен в табл.2.

Контрольные вопросы

1. Какие физические величины нагрузок подлежат определению и для чего?
2. Какие основные методы определения расчетных нагрузок применяются при проектировании СЭ?
3. Как определяется расчетная нагрузка (активная и реактивная) методом упорядоченных диаграмм?
4. Что такое эффективное (приведенное) число электроприемников и как оно определяется в т.ч. и частными случаями?
5. Как и с какой целью определяют пиковые нагрузки?
6. Перечислите вспомогательные методы определения расчетных нагрузок и объясните когда их целесообразно применять.
7. Назовите порядок определения расчетных нагрузок на напряжении до 1 кВ.
8. Назовите порядок определения расчетных нагрузок на напряжении выше 1кВ.

Таблица 7.2

Результаты расчета электрических нагрузок

Номинальное напряжение $U_n = 0,38$ кВ

Наименование узла нагрузки

Группа-2 ШС-13

№ пп	№ по плану	Исходные данные								Расчетные величины			
		По заданию технологов				по справочным данным				I_n , А	$k_n \cdot p_n$	$k_n \cdot p_n \cdot \text{tg}\varphi$	$n \cdot p_n^2$
		Наименование ЭП	Кол-во шт.	$P_{\text{ном}}$, кВт		K_n	I_n/I_n	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$				
				одного ЭП	общая								
3	2	Вентилятор	1	40	40	0,65	7	0,9	0,48	473	26,00	12,59	1600
4	3	Вентилятор	1	55	55	0,65	6,5	0,88	0,54	617	35,75	19,30	3025
5	4	Ворошитель	1	15	15	0,60	7,5	0,91	0,46	188	9,00	4,10	225
6	5а	Шнек	1	3	3	0,60	6,5	0,82	0,70	36	1,80	1,26	9
7	5б	Шнек	1	3	3	0,60	6,5	0,82	0,70	36	1,80	1,26	9
Групповые значения			5		116	0,64			0,52		74,35	38,51	4868
Результаты расчета													
		N_p	K_p	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А	I_n , А					
		2,76	1,20	89	42	99	150	706					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Тема: Составление картограмм электрических нагрузок завода

Нахождение оптимального размещения подстанций на территории промышленного предприятия (плане цеха) является одной из важнейших задач при построении рациональной системы электроснабжения.

Размещение всех подстанций должно удовлетворять минимуму приведённых затрат на систему электроснабжения.

Выбор места расположения подстанций промышленных предприятий определяется множеством факторов: назначением подстанции (понижительная, распределительная), величиной, характером и размещением электрических нагрузок на плане (генплане) проектируемого объекта, условием окружающей среды и требованиями розы ветров (для открыто расположенных подстанций), развитием промышленных предприятий, технологическими и транспортными ограничениями и др.

Общим же при выборе места расположения трансформаторных и преобразовательных подстанций всех мощностей и напряжений является необходимость расположения подстанций как можно ближе к центру питаемых ими групп нагрузок. Отсутствие от этого правила приводит к увеличению расхода проводов и кабелей, к росту потерь электроэнергии.

Для определения местоположения подстанций на генеральный план проектируемого объекта наносится картограмма электрических нагрузок (КЭН). КЭН представляет собой размещение на генеральном плане предприятия окружностей пропорциональных в выбранном масштабе расчётным нагрузкам цехов. Она позволяет проектировщику наглядно представить размещение нагрузок по территории предприятия.

Каждому цеху соответствует своя определённая окружность, центр которой совпадает с центром нагрузок цеха, а радиус определяется по формуле:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi \cdot m}}, \quad (8.1)$$

где P_i – расчётная нагрузка i -го цеха (узла нагрузки);

m – масштаб для определения площади круга, кВт/мм², исходя из того, что площадь круга соответствует расчётной нагрузке в выбранном масштабе, т.е.:

$$P_i = \pi \cdot R_i^2 \cdot m. \quad (8.2)$$

Картограммы следует наносить на генеральный план предприятия отдельно для активной и реактивной нагрузок, т.к. питание активных и реактивных нагрузок может осуществляться от разных источников.

Имеется ряд математических методов, позволяющих аналитическим путём определить центр электрических нагрузок (ЦЭН) как отдельных цехов, так и всего промышленного предприятия. Эти методы можно разделить на 2 группы.

К первой группе относятся методы, позволяющие определить условный ЦЭН как некоторую постоянную точку на генплане промышленного предприятия, и в связи с этим имеющие соответствующие недостатки. Методы, относящиеся к данной группе, являются разновидностью метода, использующего некоторые положения теоретической механики. Так если считать нагрузки цеха равномерно распределёнными по его площади, то центр нагрузок можно принять совпадающим с центром тяжести фигуры, изображающей цех в плане. Если учитывать действительное распределение нагрузок в цехе, то центр нагрузок уже не будет совпадать с центром тяжести фигуры цеха в плане, и нахождение центра нагрузок сведётся к определению центра тяжести данной системы масс.

Проведя аналогию между массами и электрическими нагрузками цехов P_i , координаты их центра можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{\sum P_i \cdot X_i}{\sum P_i}; \\ Y_0 &= \frac{\sum P_i \cdot Y_i}{\sum P_i}. \end{aligned} \quad (8.3)$$

где X_i, Y_i – координаты i -го электроприёмника или узла нагрузки, м;
 P_i – расчётная нагрузка i -го электроприёмника или узла нагрузки, кВт.

Таким образом, определяется некоторая постоянная точка на генеральном плане промышленного предприятия. Однако такое допу-

щение нельзя считать строгим, и найденный ЦЭН рассматривается как условный центр. В действительности положение найденного ЦЭН не будет постоянным в следствии:

- а) изменения потребляемой мощности отдельным приёмником, цехом и предприятием в целом;
- б) изменения сменности промышленного предприятия;
- в) развития предприятия. В связи с этими факторами ЦЭН описывает во времени на генплане промышленного предприятия фигуру сложной формы (зону рассеяния ЦЭН).

Методы, позволяющие определить ЦЭН в виде зоны его рассеяния, относятся ко второй группе методов.

Для определения зоны рассеяния ЦЭН необходимо знать закон распределения координат ЦЭН. Было установлено, что распределение случайных координат ЦЭН подчиняется нормальному закону (закону Гаусса-Лапласа), т.е.:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(X-A_x)^2}{2\sigma_X^2}}; f(y) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(Y-A_y)^2}{2\sigma_Y^2}}, \quad (8.4)$$

где A_x, A_y – математические ожидания случайных величин (координат);

σ_X^2, σ_Y^2 – дисперсии случайных координат.

Обозначив:

$$h_X = \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2}}; h_Y = \frac{1}{\sigma_Y \cdot \sqrt{2}}, \quad (8.5)$$

получим:

$$f(x) = \frac{h_X}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-h_X^2 \cdot X^2}; f(y) = \frac{h_Y}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-h_Y^2 \cdot Y^2}, \quad (8.6)$$

где h_X, h_Y – меры точности случайных величин.

Плотности распределения вероятностей случайных координат изображаются в прямоугольной системе координат в виде кривой нормального распределения. Двумерная плотность распределения ве-

роятностей случайных независимых координат выражается формулой:

$$f(x, y) = \frac{h_x \cdot h_y}{\pi} \cdot e^{-(h_x^2 \cdot X^2 + h_y^2 \cdot Y^2)}. \quad (8.7)$$

При определении теоретического закона распределения величины входящие в данную формулу неизвестны и при их определении предполагается, что они совпадают с соответствующими величинами эмпирического распределения. Числовые характеристики эмпирического распределения определяются из следующих выражений:

$$A_x = \sum_{k=1}^N X_k \cdot P_{kX}; \quad A_y = \sum_{k=1}^N Y_k \cdot P_{kY}. \quad (8.8)$$

$$\sigma_X^2 = \sum_{k=1}^N P_{kX} (X_k - A_x)^2; \quad \sigma_Y^2 = \sum_{k=1}^N P_{kY} (Y_k - A_y)^2. \quad (8.9)$$

Определим зону рассеяния ЦЭН. Пересечём поверхность нормального распределения горизонтальной плоскостью (H), параллельной плоскости X_0Y . Проекция полученного сечения на плоскость X_0Y ограничена кривой, которая описывается выражением:

$$H = Q \cdot e^{-(h_x X^2 + h_y Y^2)}$$

или
$$\ln \frac{Q}{H} = h_x^2 X^2 + h_y^2 Y^2, \quad (8.10)$$

где:
$$Q = \frac{h_x h_y}{\pi}. \quad (8.11)$$

Тогда имеем уравнение эллипса, полуоси R_x, R_y которого равны:

$$R_x = \frac{1}{h_x} \sqrt{\ln \frac{Q}{H}}; \quad R_y = \frac{1}{h_y} \sqrt{\ln \frac{Q}{H}}. \quad (8.12)$$

Определим вероятность попадания случайных координат внутрь (λ) – эллипса, обозначив:

$$\ln \frac{Q}{H} = \lambda^2, \quad (8.13)$$

получим уравнение эллипса:

$$\lambda^2 = h_x^2 \cdot X^2 + h_y^2 \cdot Y^2. \quad (8.14)$$

Вероятность $P(\lambda)$ попадания случайных координат X, Y внутрь (λ) – эллипса равна:

$$P(\lambda) = \frac{h_X \cdot h_Y}{\pi} \iint_{S\lambda} e^{-(h_X^2 X^2 + h_Y^2 Y^2)} dx dy, \quad (8.15)$$

где: $S \dots \lambda$ – площадь, ограниченная (λ) – эллипсом.

$$P(\lambda) = 1 - e^{-\lambda^2}. \quad (8.16)$$

Приняв в качестве доверительной вероятности значение $P(\lambda) = 0,95$ и решив предыдущее уравнение, получим $\lambda^2 = 3$. Следовательно:

$$R_x = \frac{\sqrt{3}}{h_X}; \quad R_y = \frac{\sqrt{3}}{h_Y}. \quad (8.17)$$

Таким образом, зона рассеяния ЦЭН промышленного предприятия представляет собой эллипс. Форма эллипса зависит от соотношения величин h_X, h_Y . Для построения зоны рассеяния ЦЭН достаточно осуществить параллельный перенос осей координат так, чтобы начало новой системы совпало с величинами математических ожиданий Q_x, Q_y . По значениям радиусов полуосей эллипса R_x, R_y , совпадающих по направлению с осями новой системы координат, и строится зона рассеяния координат ЦЭН.

На зону рассеяния ЦЭН промышленного предприятия оказывают существенное влияние зоны рассеяния ЦЭН цехов, посылая свои возмущения не из одной точки (условный ЦЭН), а из разных точек так, как будто ЦЭН цеха скользит по своему эллипсу рассеяния. В связи с этим зона рассеяния ЦЭН предприятия, во-первых, увеличивается в размерах и, во-вторых, с учётом поворота осей эллипсов рассеяния цехов, приближается к окружности.

Если известен ряд значений пары чисел X_i, Y_i , то эмпирический, т. е. полученный на основании экспериментальных данных, коэффициент корреляции можно определить по следующей формуле:

$$K_k = \frac{\sum_1^N (X_i - A_x)(Y_i - A_y)}{\sqrt{\sum_1^N (X_i - A_x)^2 \cdot \sum_1^N (Y_i - A_y)^2}}, \quad (8.18)$$

где N – количество пар чисел статистической совокупности;

X_i, Y_i , – координаты i -й нагрузки, м

A_x, A_y – эмпирические математические ожидания, м.

В общем случае коэффициент корреляции может иметь значения $-1 < K_k < 1$.

Следовательно, можно сказать, что оси эллипса рассеяния образуют с осями координат некоторый угол (α), который определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{\operatorname{arctg} \frac{2 \cdot K_k \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Y}{\sigma_X^2 - \sigma_Y^2}}{2}, \quad (8.19)$$

где σ_X^2, σ_Y^2 – эмпирические дисперсии.

Угол α может быть положительным или отрицательным в зависимости от выбранного положения осей координат; значение его находится в прямой зависимости от коэффициента корреляции.

Обычно при выборе координатных осей стараются заранее сориентировать координатные оси так, чтобы они примерно совпали с осями симметрии эллипса рассеяния. В этом случае нормальный закон распределения будет определяться выражением (4), а его числовые характеристики – формулами (8.5, 8.8, 8.9). Когда это сделать невозможно заранее, для построения эллипса рассеяния начало координат необходимо перенести в точку A_x, A_y , а координатные оси повернуть на угол α . При этом нормальный закон распределения в новой системе координат (ψ, φ) будет иметь вид:

$$f(\psi, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\psi\sigma_\varphi} e^{-\frac{\psi^2}{2\sigma_\psi^2} - \frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}}. \quad (8.20)$$

Величины ψ и φ выражаются через средние квадратичные отклонения в прежней системе координат формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_\psi^2 &= \sigma_X^2 \cdot \cos^2 \alpha + K_k \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Y \cdot \sin 2\alpha + \sigma_Y^2 \cdot \sin^2 \alpha; \\ \sigma_\varphi^2 &= \sigma_X^2 \cdot \sin^2 \alpha + K_k \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Y \cdot \sin 2\alpha + \sigma_Y^2 \cdot \cos^2 \alpha, \end{aligned} \quad (8.21)$$

а полуоси эллипса рассеяния определяются в этом случае следующим образом:

$$R_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{3}}{h_{\text{ш}}}; \quad R_{\varphi} = \frac{\sqrt{3}}{h_{\varphi}},$$

где

$$h_{\text{ш}} = \frac{1}{\sigma_{\text{ш}} \cdot \sqrt{2}}; \quad h_{\varphi} = \frac{1}{\sigma_{\varphi} \cdot \sqrt{2}}. \quad (8.22)$$

Таким образом, для выбора оптимального местоположения питающих подстанций на стадии проектирования или эксплуатации (при реконструкции), необходимо определять зоны рассеяния центров электрических активных и реактивных нагрузок отдельно, для оптимального размещения соответствующих источников мощности по территории промышленного предприятия, по методике изложенной выше. При этом необходимо учитывать перспективу развития предприятия через 10 – 15 лет. Следовательно, наиболее правильной постановкой задачи является определение местоположения подстанций с учётом динамики электропотребления как отдельных цехов, так и всего промышленного предприятия.

1. Основные статистические функции EXCEL, используемые в лабораторной работе

КВАДРОТКЛ(число1;число2;...) – возвращает сумму квадратов отклонений точек данных от их среднего.

Число1, число2, ... – это от 1 до 30 аргументов, для которых вычисляется сумма квадратов отклонений. Можно использовать массив или ссылку на массив вместо аргументов, разделяемых точкой с запятой.

Аргументы должны быть числами или именами, массивами или ссылками, содержащими числа.

Если аргумент, который является массивом или ссылкой, содержит тексты, логические значения или пустые ячейки, то такие значения игнорируются; однако, ячейки с нулевыми значениями учитываются.

Уравнение для суммы квадратов отклонений имеет следующий вид:

$$\text{КВАДРАТОТКЛ} = \sum (x - \bar{x})^2$$

Пример: КВАДРОТКЛ(4;5;8;7;11;4;3) равняется 48.

СТАНДОТКЛОН(число1; число2; ...) – оценивает стандартное отклонение по выборке. Стандартное отклонение – это мера того, насколько широко разбросаны точки данных относительно их среднего.

Число1, число2, ... – это от 1 до 30 числовых аргументов, соответствующих выборке из генеральной совокупности. Можно использовать массив или ссылку на массив вместо аргументов, разделяемых точкой с запятой.

СТАНДОТКЛОН предполагает, что аргументы являются только выборкой из генеральной совокупности. Если данные представляют всю генеральную совокупность, то стандартное отклонение следует вычислять с помощью функции СТАНДОТКЛОНП.

Логические значения, такие как ИСТИНА или ЛОЖЬ, а также текст игнорируются. Если текст и логические значения игнорироваться не должны, следует использовать функцию рабочего листа СТАНДОТКЛОНА.

СТАНДОТКЛОН использует следующую формулу:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}{n \cdot (n - 1)}}.$$

Пример:

СТАНДОТКЛОН(1345, 1301, 1368, 1322, 1310, 1370, 1318, 1350, 1303, 1299) равняется 27,46

КОВАР(массив1; массив2) – возвращает ковариацию, то есть среднее произведений отклонений для каждой пары точек данных. Ковариация используется для определения связи между двумя множествами данных. Например, можно проверить, соответствует ли более высокому уровню доходов более высокий уровень образования.

Массив1 – это первый массив или интервал данных.

Массив2 – это второй массив или интервал данных.

Аргументами должны быть числа или имена, массивы, ссылки, которые содержат числа.

Если аргумент, который является массивом или ссылкой, содержит текст, логические значения или пустые ячейки, то такие значения игнорируются; однако, ячейки с нулевыми значениями учитываются.

Если массив1 и массив2 имеют различное число данных, то КОВАР возвращает значение ошибки #Н/Д.

Если либо массив1, либо массив2 пуст, то КОВАР возвращает значение ошибки #ДЕЛ/0!

Ковариация определяется следующим образом:

$$\text{cov}(x, y) = \text{КОВАР}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x) \cdot (y_j - \mu_y).$$

Пример: КОВАР({3; 2; 4; 5; 6}; {9; 7; 12; 15; 17}) равняется 5,2.

КОРРЕЛ(массив1; массив2) – возвращает коэффициент корреляции между интервалами ячеек массив1 и массив2. Коэффициент корреляции используется для определения наличия взаимосвязи между двумя свойствами. Например, можно установить зависимость между средней температурой в помещении и использованием кондиционера.

Аргументы должны быть числами или именами, массивами или ссылками, содержащими числа.

Если аргумент, который является массивом или ссылкой, содержит тексты, логические значения или пустые ячейки, то такие значения игнорируются; однако, ячейки с нулевыми значениями учитываются.

Если массив1 и массив2 имеют различное количество точек данных, то функция КОРРЕЛ возвращает значение ошибки #Н/Д.

Если массив1 либо массив2 пуст, или если s (стандартное отклонение) их значений равно нулю, то функция КОРРЕЛ возвращает значение ошибки #ДЕЛ/0!

Уравнение для коэффициента корреляции имеет следующий вид:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}.$$

Пример: КОРРЕЛ({3;2;4;5;6};{9;7;12;15;17}) равняется 0,997054.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Подготовить исходные данные в соответствии с вариантом задания.
2. Занести исходные данные в электронную таблицу, выполняющую расчет картограммы нагрузок и параметров зоны рассеяния услов-

ного центра электрической нагрузки для промышленного предприятия.

3. Получить распечатку результатов расчета.
4. Выполнить построение картограммы нагрузок и эллипса зоны рассеяния условного центра нагрузок на плане размещения цехов предприятия.

Ход работы:

1. Загрузить программу EXCEL.
2. В соответствующей клетке указать ФИО выполняющего лабораторную работу.
3. Заполнить исходными данными таблицу для расчета центра электрических нагрузок: координаты (X_i, Y_i) и нагрузку P_i для i -го объекта на генплане согласно заданного варианта.
4. Подобрать в соответствующей клетке значение масштаба m (кВт/см) для расчета радиусов окружностей.
5. Заполнить графики нагрузок в таблице для расчета зоны рассеяния условно ЦЭН в соответствии с вариантом задания. Программа автоматически выполнит расчеты и разместит результаты в соответствующих клетках таблицы.
6. Результаты расчетов вывести на печать. Пример результата расчета приведен в табл.4.

Контрольные вопросы

1. Понятие центра электрических нагрузок, для чего его определяют?
2. Какие существуют методы определения ЦЭН ?
3. Понятие зоны рассеяния ЦЭН и причины ее возникновения.
4. Для чего определяют зону рассеяния ЦЭН и от чего зависят ее размеры?
5. Картограмма нагрузок, для чего ее выполняют и каким образом?
6. Какие характеристики электропотребления отображают на картограмме нагрузок?

Таблица 8.1

Результаты расчета картограммы нагрузок

Выполнил		ФИО				Дата	20.11.02 8:14	
Масштаб	m=	2	кВт/см ²					
<i>Расчет условного ЦЭН</i>								
Параметр	Потребитель						Центр	
	1	2	3	4	5	6		
$X, \text{ м}$	210	320	220	590	590	1010	789	
$Y, \text{ м}$	560	370	200	460	210	410	390	
$P, \text{ кВт}$	90	45	85	185	160	860		
$R_a, \text{ см}$	3,78	2,68	3,68	5,43	5,05	11,70		
<i>Расчет условного ЦЭН и зоны рассеяния</i>								
$T, \text{ час}$	Суточный график						X_0	Y_0
1	30	11	41	110	81	186	696	377
2	25	10	40	100	80	170	694	372
3	25	10	35	95	77	153	689	373
4	20	10	30	95	73	140	692	373
5	15	10	30	95	76	140	697	369
6	10	10	30	100	81	150	709	367
7	20	12	35	110	98	195	714	370
8	50	20	56	132	121	410	751	381
Центр эллипса		Среднее значение					705	373
Статистические параметры нагрузок		Ср.квдр-е откл-е		σ^2		2901	144	
		Стандартное откл-е		σ		19,0	4,2	
		Ковариация		cov			329	
		Корреляция		K			0,51	
Угол наклона осей эллипса						α	0,117 рад	
							6,7 град	
		Дисперсия по оси ψ		σ_ψ		19,17		
		Дисперсия по оси φ		σ_φ		3,63		
Радиусы полуосей эллипса						R_ψ	47,0 м	
						R_φ	8,9 м	

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн и др. Л.: Энергия, 1971.
2. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. –М.: Издательство «Мастерство», 2001. – 320с.
3. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224с.
4. Радкевич В.Н. Проектирование систем электроснабжения: Учеб. пособие. – Мн.: НПООО "ПИОН", 2001. –292с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1	4
Лабораторная работа № 2	20
Лабораторная работа № 3	36
Лабораторная работа № 4	41
Лабораторная работа № 5	50
Лабораторная работа № 6	59
Лабораторная работа № 7	71
Лабораторная работа № 8	79
Литература	90

**Алферова Тамара Викторовна
Бахмутская Валентина Владимировна**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

**Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05
«Электроснабжение предприятий
агропромышленного комплекса»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного документа
учебно-методических материалов 04.11.09.

Рег. № 93Е.

E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>